

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

UHLÍKOVÁ VLÁKNA PRO TECHNICKÉ
APLIKACE

CARBON FIBRES FOR TECHNICAL
APPLICATIONS

Počet stran: 51

Počet tabulek: 4

Počet obrázků: 26

Počet příloh: 10

LIBEREC 2011

MARIE ŘIČICOVÁ

Zadání bakalářské práce (2011/2012)

Pro: Marie Řičicová

Název: Uhlíková vlákna pro technické aplikace

Seznam literatury:

1. Grégr, J.: Uhlíková vlákna, TU Liberec, 2002.
2. Hague, P.: Průzkum trhu, Computer Press, 2003.
3. Interní informace firem zabývajících se výrobou a prodejem uhlíkových vláken

Zadání:

1. Proved'te literární rešerši k danému tématu.
2. Charakterizujte rozdělení uhlíkových vláken z hlediska jejich struktury a vlastností.
3. Zjistěte, v jakých typech aplikací se uhlíková vlákna používají a proč?
3. Proved'te průzkum světového trhu s uhlíkovými vlákny a zjistěte, které firmy se zabývají výrobou uhlíkových vláken a jaké typy vláken dodávají na trh.
4. Porovnejte uhlíková vlákna jednotlivých výrobců z hlediska jejich užitných vlastností a ceny a určete, pro které technické aplikace byste jednotlivé typy vláken doporučili.

Vedoucí BP: Ing. Blanka Tomková, Ph.D.

Rozsah: 30-40 stran

P r o h l á š e n í

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 18. 12. 2011

Podpis: Marie Řičicová

Poděkování

Na tomto místě bych velice ráda poděkovala mému konzultantovi panu Ing. Janu Grégrovi, za jeho podporu, cenné rady a čas, který mi v průběhu vzniku práce věnoval. Dík také patří mé vedoucí bakalářské práce paní Ing. Blance Tomkové, Ph. D. od které se mi též dostalo rady a užitečných připomínek.

Dále bych chtěla poděkovat firmám uhlíkových vláken, konkrétně jejich zástupcům, kteří byli ochotni komunikovat a poskytl mi informace.

Velký dík patří především mým rodičům, sourozencům a příteli, kteří mě podporovali a stáli při mně po dobu celého studia a přátelům za jejich přítomnost, pomoc a podporu.

ANOTACE

Cílem této práce je charakterizovat různé typy uhlíkových vláken z hlediska jejich struktury a vlastností. Z nejdůležitějších vlastností uhlíkových vláken jsou zde vyzdvíženy zejména tyto vlastnosti: modul pružnosti a pevnost. Pro dobrou orientaci je zde nastíněn jeden ze způsobů výroby uhlíkových vláken a následně možnost jeho dalšího využití v běžných i speciálních aplikacích. Práce obsahuje grafické znázornění prognóz výroby a spotřeby uhlíkových vláken do roku 2020.

Práce zahrnuje přehled světových firem vyrábějících uhlíková vlákna. Jednotlivé firmy a názvy jejich vláken jsou rozčleněny dle užitných vlastností. Vybraná vlákna jsou uvedena a graficky znázorněna. Jsou zde doporučena některá využití pro konkrétní typy vláken, a také je zde nastíněna finanční dostupnost uhlíkových vláken a uvedeny vybrané konkrétní ceny uhlíkových vláken od prodejců.

Úkolem bylo také provedení literární rešerše, jejíž výsledky jsou zahrnuty v úvodu této bakalářské práce.

Přílohy obsahují zejména tabulky uhlíkových vláken, které byly v této práci použity.

Pro práci byla využita doporučená literatura, interní firemní data čerpaná z katalogů, pomoci spolupráce emailovou korespondencí, telefonickou komunikací a prostřednictvím internetu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Uhlík

Uhlíková vlákna

Výroba uhlíkových vláken

Vlastnosti

Modul pružnosti

Pevnost

Použití uhlíkových vláken

Výrobci uhlíkových vláken

Cena

ANNOTATION

The goal of this work is to characterise different kinds of carbon fibres according to their structure and attributes. Amongst the most important qualities of carbon fibres, the module of elasticity and the firmness are particularly emphasized. For the sake of good orientation the method of producing carbon fibres is outlined, proceeding with the possibilities of its next use in regular as well as its special applications. The work includes a graphical representation of the production prognosis and the consumption prognosis of carbon fibres until 2020.

The work includes an oversight of the companies producing carbon fibres in the world. Each company and the names of its fibres are sorted by the characteristics of use. Selected fibres are presented in description as well as graphically. Some kinds of application for specific sorts of fibres are recommended, the financial availability of carbon fibres is discussed with mentioning of actual prices of the carbon fibres by the retailers.

Next goal of this work was to do a literary recherche, its results are included in the introduction.

Appendix contain especially table of carbon fibres used in this work.

For the creating of the work the recommended literature was used, as well as intern company informations drawn from catalogues, from the cooperation by the e-mail communication, phone communication and from the internet resources.

KEY WORD

Carbon

Price

Carbon fibres

Carbon fibres producing

Characteristics

Module of elasticity

Strength

Application of carbon fibres

Companies producing carbon fibres

Obsah

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | ÚVOD | 8 |
| 2. | UHLÍK | 9 |
| 2.1 | Alotropy uhlíku | 9 |
| 2.2 | Progresivní uhlíkové materiály | 12 |
| 3. | UHLÍKOVÁ VLÁKNA | 14 |
| 3.1 | Struktura uhlíkových vláken | 14 |
| 3.2 | Vlastnosti uhlíkových vláken | 18 |
| 3.3 | Výroba uhlíkových vláken | 20 |
| 3.4 | Použití uhlíkových vláken | 24 |
| 4. | VÝZNAMNÉ FIRMY VYRÁBĚJÍCÍ UHLÍKOVÁ VLÁKNA | 28 |
| 4.1 | Předpokládaná kapacitní produkce uhlíkových materiálů pro rok 2011 .. | 29 |
| 4.2 | Rozčlenění výrobců uhlíkových vláken a jejich produkty | 30 |
| 5. | FINANČNÍ DOSTUPNOST UHLÍKOVÝCH VLÁKEN | 43 |
| 6. | ZÁVĚR | 46 |
| 7. | LITERATURA | 47 |
| | WEBOVÉ ODKAZY CEN UHLÍKOVÝCH VLÁKEN | 50 |
| | SEZNAM OBRAZKŮ | 52 |
| | SEZNAM WEBOVÝCH STRÁNEK VÝROBCŮ | 55 |
| | PŘÍLOHY | 57 |

1. ÚVOD

Tématem této bakalářské práce jsou uhlíková vlákna. Toto téma je velmi aktuální a zajímavé, a to zejména proto, že uhlíková vlákna charakterizují zajímavé užité vlastnosti, které umožňují širokou škálu specifického, ale i všeobecného uplatnění. Uhlík se používá ve strojírenství, stavebnictví, elektronice, v laboratořích, své místo zaujímá i v medicíně (jak v diagnostice, tak i v léčbě). Díky svým osobitým vlastnostem se významně podílí na rozvoji neobvyklého, pokrokového oboru, jako je kosmonautika a letectví, kde je jeho přítomnost často nezbytná a nenahraditelná. Obsahem této práce je charakteristika a rozdělení uhlíkových vláken z hlediska jejich struktury a užitných vlastností. Je zde uvedeno v jakých typech aplikací se uhlíková vlákna používají a co je podnětem k volbě právě tohoto materiálu. V další části bakalářské práce jsou uvedeny výsledky průzkumu světového trhu s uhlíkovými vlákny. Jsou zde uvedeni nejen nejvýznamnější producenti, ale jsou také i zveřejněny jaké typy uhlíkových vláken dodávají na trh. Práce zahrnuje porovnání uhlíkových vláken z hlediska jejich nejvýznamnějších užitných vlastností a ceny.

V práci je využita doporučená literatura zabývající se uvedeným odborným tématem, jejímž autorem je Ing. Jan Grégr, a skripta VŠCHT „Úvod do studia materiálů“. Krom těchto děl a záznamů jsou zde aplikovány informace z přednášek TUL.

I když je uhlík znám již od pradávna, a i jako prvek je znám již značnou dobu, uhlíková vlákna se začala vyrábět až v minulém století. Jejich vývoj byl sice dynamický, ale z důvodů jejich finanční nedostupnosti nebylo možno tato vlákna běžně používat. Přesto vývoj tohoto prvku a těchto vláken nezahálel, příkladem nám mohou být dvě Nobelovy ceny s nimi související. I když uhlíková vlákna jsou aktuální téma, tak kromě několika publikací, zejména od výše uvedeného autora, není snadné najít mnoho publikací v českém, jazyce. Z těchto důvodů jsou zde využity cizojazyčné texty, dostupné na internetu. Čerpáno je zejména z informací přímo od výrobců, jsou zde také informace z několika odborných časopisů a záznamů ze světových technických konferencí zabývajících se právě uhlíkovými vlákny. Práce je podložena studiem mnoha dalších odborných textů zabývajících se tímto tématem, které nejsou uvedeny v této bakalářské práci, protože zde z nich není přímo citováno ani parafrázováno.

2. UHLÍK

Uhlík byl znám už ve starověku (ve formě dřevěného uhlí a sazí), avšak jako prvek je uznáván až od poloviny 18. století [1].

Uhlík je kyselinotvorný prvek, výlučně nekovové povahy. K sousedním atomům se obvykle váže kovalentní vazbou, je však schopen vázat se s elektropozitivními i elektronegativními prvky. Atomy uhlíku mohou tvořit jednoduché, dvojné i trojné vazby. Ve sloučeninách je schopen tvořit řetězce neomezené délky. Řetězce mohou být lineární, rozvětvené nebo cyklické [2].

V přírodě se vyskytuje jak volný (grafit a diamant), tak vázaný např. v oxidu uhličitém. Je hlavní stavební jednotkou veškeré živé hmoty [3].

Obecně nejznámější modifikace uhlíku jsou grafit a diamant. V technické praxi se setkáváme s několika dalšími speciálními materiály. Jsou známé i jiné alotropy uhlíku a to fullereny [1].

2.1 Alotropy uhlíku

GRAFIT (též tuha) je charakteristický vrstevnatou strukturou. Každá vrstva je tvořena uspořádanými šestiúhelníky (viz Obr. 1). Jednotlivé vrstvy jsou mezi sebou jen slabě vázané, proto se může po těchto vrstvách tuha otírat - tedy lze jí psát [4, 5].

Podobná forma uspořádání uhlíku, ale pouze v jedné vrstvě atomu, je známa jako GRAFEN (viz Obr. 1). Grafen je v současné době nejpevnější známý materiál na světě. Monovrstva grafenu je velmi dobrý elektrický vodič, jehož vodivost lze v rozmezí vodič-izolant měnit dopováním vodíku. Grafenová dvojvrstva se chová jako polovodič [6, 7].

Díky výzkumu specifické formy uhlíku – grafenu, získali profesori Andre Geim a Konstantin Novoselov z Univerzity v Manchesteru v roce 2010 Nobelovu cenu za fyziku [7].

DIAMANT je nejtvrdší přirozenou látkou - má nejtvrdší strukturu, každý atom uhlíku je poután se čtyřmi sousedními atomy (viz Obr. 1). Diamant má nejvyšší tepelnou vodivost (5x vyšší než je u mědi). Díky své tvrdosti je používán k výrobě

nejrůznějších řezných a vrtných nástrojů, které se díky jeho výtečné tepelné vodivosti nepřehřívají [3].

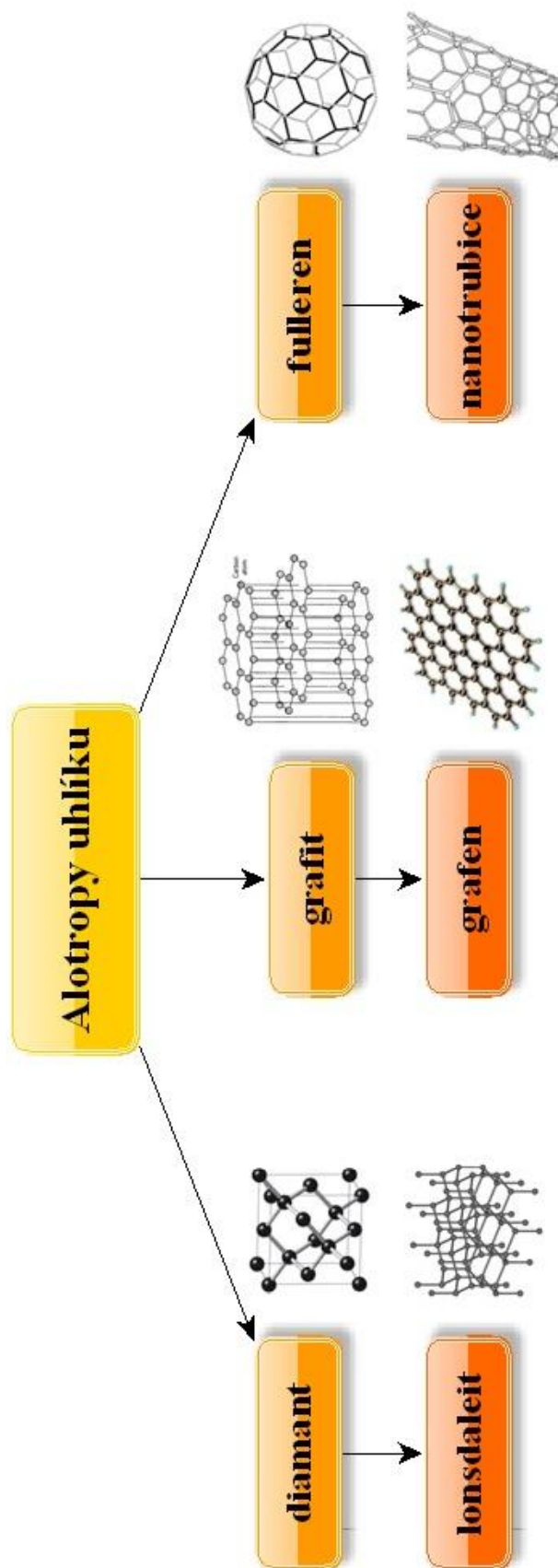
"Šesterečný diamant" zvaný LONSDALEIT se vyskytuje velmi ojediněle. Jeho krystalová struktura je tvořena podobně jako u diamantu atomy uhlíku vázanými jednoduchými kovalentními vazbami se čtyřmi sousedními atomy, krystalová soustava je však šesterečná [8].

FULLEREN je látka obecného vzorce C_n , kterou tvoří klastry (mnohostěny víceméně kulovitěho tvaru). Jsou to molekuly složené z dvaceti a více atomů uhlíku, přičemž atomy jsou umístěny na vrcholech mnohostěnů. Fullereny vznikají v elektrickém oblouku mezi grafitovými elektrodami, lze je též získat laserovým odpařováním grafitu. Nejdokonalejší kulovitý tvar má fullerén s molekulou C_{60} (viz Obr. 1), kde jsou atomy uhlíku rovnocenné.

Robert Curl, Sir Harold Kroto a Richard Smalley získali za objevení fullerénů v roce 1996 Nobelovu cenu za chemii [1].

UHLÍKOVÉ NANOTRUBICE (carbon nanotube) jsou prakticky fullerénové vrstvy svinuty do válcového tvaru (viz. Obr. 1), UHLÍKOVÉ NANOROHY (carbon nanotube) jsou zakončením karbonových trubic. Uhlíkové nanotrubičky patří již do progresivních materiálů. Patří mezi nejmodernější uhlíkové materiály, jejichž mechanické vlastnosti se blíží teoretickým hodnotám (E-modul se blíží 1 TPa - teoretickému modulu, vyplývajícímu z energie vazby mezi uhlíky, pevnost v tahu se předpokládá až 200 GPa). Objemová výroba vychází z katalytického rozkladu plynů obsahujících vhodně vázaný uhlík na vhodných podložkách. Při velmi rychlém katalytickém růstu vznikají útvary ve tvaru nanorohů (viz Obr. 1). Mají schopnost zachycovat velké objemy plynů, iontů, vyztužovat polymerní vlákna a sloužit jako základní materiál v nanotechnologiích [9, 10].

Uhlíkové nanotrubičky mají mnohé využití ve zdravotnictví, letectví, kosmonautice, strojírenství a elektrotechnice.



Obr. 1 Alotropy uhlíku

2.2 Progresivní uhlíkové materiály

Mezi progresivní uhlíkové materiály s nejrozšířenějším uplatněním, díky jejich specifickým vlastnostem, patří: pružný grafit, pyrolytický uhlík, skelný uhlík, uhlíkové aerogely, uhlíkové nanopěny, uhlíkové nanotrubičky a nanorohy, uhlíková vlákna a kompozity polymer-uhlíková vlákna a uhlík-uhlíková vlákna [10].

PRUŽNÝ (EXPANDOVANÝ) GRAFIT (flexible graphite) vzniká interkalační reakcí vysoce orientovaného pyrolytického nebo přírodního grafitu s oxidačními činidly. Po tepelném zpracování je tímto způsobem vytvořený expandovaný grafit lisován bez použití pojidel a výztuže na pružné fólie. Vlivem vrstevnaté struktury vykazuje silnou anizotropii. Má samomazné vlastnosti a také dobrou elektrickou i tepelnou vodivost. Používá se pro výrobu speciálních těsnění v širokém rozsahu teplot a pro agresivní média [1, 11].

PYROLYTICKÝ UHLÍK (pyrolytic carbon) je monolitický materiál získaný chemickým rozkladem těkavých uhlovodíkových sloučenin (typicky metanu) na podložce za vysokých teplot ve vakuové peci. Je prakticky nepropustný pro plyny, tepelná a elektrická vodivost závisí na stupni orientace vrstev. Průmyslové využití je v oblasti rezistorů, povlaků pro jaderná paliva, jako vystýlka raketových trysek. Díky své bioneutralitě se používá i v medicíně [1, 12].

SKELNÝ UHLÍK (glass-like carbon) je monolitický negrafitující uhlík s velkou izotropií strukturních i fyzikálních vlastností. Vyrábí se dlouhodobým vysokoteplotním rozkladem (pyrolýzou) termosetových polymerů, které mají vytvořenu trojrozměrnou strukturní síť. Je prakticky nepropustný pro kapaliny i plyny. Používá se v analytické chemii, dále pro čištění kovů a k výrobě stavebních prvků v jaderné technice. Je vysoce biokompatibilní, proto má využití v medicíně na implantáty [10].

UHLÍKOVÁ NANOPĚNA (carbon nanofoam) je nyní nejnovější formou uhlíku. Přípravuje se vystavením uhlíkového terčiku působení výkonného laserového pulsního systému v argonové atmosféře. Mikrostruktura připomíná vzájemně propojené sítě uhlíkových trubiček. Vnitřní struktura uhlíkové nanopěny obsahuje 35% uhlíku v

hybridizaci sp^3 a na rozdíl od všech dosud známých diamagnetických forem uhlíku vykazuje paramagnetické chování. Nanopěna složená pouze z atomů uhlíků se chová jako ferromagnetická látka, a proto může mít velmi užitečné aplikace. V současnosti se využívá zejména v medicíně [10, 13].

UHLÍKOVÉ AEROGELY (carbon aerogels) jsou vyráběny karbonizací aerogelů připravených z resorcinformaldehydových pryskyřic. Jsou vyznačovány nízkou měrnou hmotností, supernízkou tepelnou vodivostí (dobře pohlcuje teplo), vysokým měrným povrchem (cca okolo $400-1000 \text{ m}^2/\text{g}$) a zajímavými elektrickými vlastnostmi. Využití nacházejí nejen jako tepelné izolace, ale především v dobíjecích bateriích a palivových článcích a jako nosiče katalyzátorů. Malé superkondenzátory s aerogelem jsou vhodné jakou zálohovací baterie v nízkopříkonové mikroelektronice [10, 14].

3. UHLÍKOVÁ VLÁKNA

3.1 Struktura uhlíkových vláken

Struktura uhlíkových vláken byla, a stále je, podrobně studována. Důvodem není jen samotná struktura, ale též informace vedoucí ke kvalitnějšímu využití užitných vlastností uhlíkových vláken, především jejich pevnost, tuhost, tepelná a elektrická vodivost. Základní motiv struktury uhlíkových vláken je monoatomová vrstva uhlíkových atomů ve vazebném stavu sp^2 , která má tvar pruhů, jejichž obrys je nepravidelný a mohou obsahovat „vakance“ (díry) uhlíkových atomů. Pruhy mají délku několika stovek nm a šířku v jednotkách několika nm. Tyto pruhy jsou naskládány na sobě a tvoří tak mikrofibrily [1].

Skládání pruhů způsobuje „turbostratický nepořádek“. Mikrofibrily jsou orientovány téměř rovnoběžně s osou vláken a jsou mírně zvlněné. Prostor mezi mikrofibrilami není zcela zaplněn, proto vznikají ve vláknech póry. Vlákná s vyšším modulem pružnosti vykazují vyšší orientaci a větší velikost srovnaných celků, pro něž byly vytvořeny modely znázorňující stavební prvky vláken jako krystalická zrna. Rozdílné charakteristiky příčných řezů vláken daly podklad pro vznik modelů prostorové orientace mikrofibril ve vláknech [1].

Vazebný stav uhlíkových atomů sp^2 je vysvětlován hybridizací atomových orbitalů. Základní stav elektronového obalu uhlíku znázorňujeme:



Obr. 2 Základní stav elektronové konfigurace uhlíkového atomu

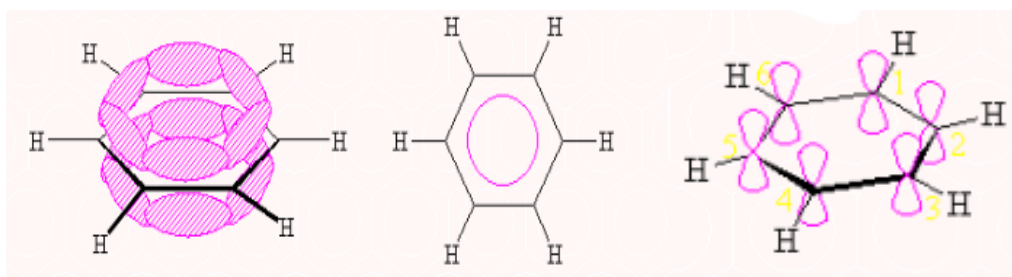
Působením pole přibližujících se atomů dochází někdy k přeskočení elektronu z orbitalu $2s$ do orbitalu $2p_z$ a atom se tak dostane do excitovaného stavu:



Obr. 3 Excitovaný stav elektronové konfigurace uhlíkového atomu

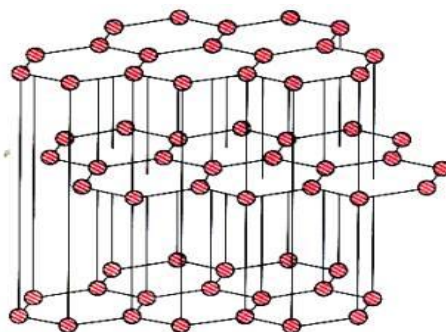
Dříve než se vytvoří kovalentní vazby, dochází ke sjednocení orbitalů (hybridizaci), které obsahují nepárový elektron, tak, aby mohly být vytvořeny pravidelně uspořádané ekvivalentní vazby, což zajišťuje v atomu uhlíku interakce orbitalů $2s$, $2p_x$ $2p_y$ tak, že bude mezi hybridizovanými orbitaly úhel 120° . Orbital $2p_z$ se hybridizace neúčastní [1].

Dojde-li k vazbě atomů s hybridizovanými orbitaly, je uspořádání atomů plošné, s úhly vazeb 120° . Tato vazba na spojnici obou atomových jader se označuje jako δ -vazba. Orbitaly $2p_z$ se zúčastní vazby mezi atomy tak, že jejich překryvem vzniknou nad a pod rovinou základních δ -vazeb molekulární orbitály, což je označováno jako π -vazba (která má jiný charakter, než základní δ -vazba). Odlišnost vazeb je nejvíce zjevná v konjugovaném uspořádání – v uhlíkovém řetězci, kde se zcela pravidelně střídají jednoduché a dvojné vazby. π -elektrony se mohou volně pohybovat v celém konjugovaném systému, neboť π -vazby jsou vzájemně propojeny, protože dojde k překryvu π -molekulárních orbitalů. Výsledkem může být barevnost a elektrická vodivost sloučenin. Na molekule benzenu lze nejjednodušeji znázornit vznik konjugovaného systému π -molekulárních orbitů [1].



Obr. 4 Struktura benzenového jádra s delokalizovanými elektrony

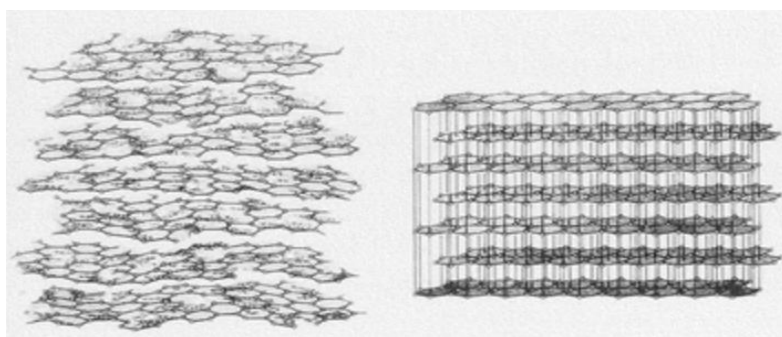
U grafitu je na základě strukturálního výzkumu předpokládán systém dvojných konjugovaných vazeb. δ -vazby tvoří kostru plošného uspořádání C atomů a π -molekulární orbity jsou nad a pod plochami základní δ -vazby a spojují mezi sebou tyto plošné roviny. Z důvodu odpuzivého efektu obsazených π -molekulárních orbitů je vzdálenost mezi rovinami podstatně větší než vzdálenost atomů v rovinách [1].



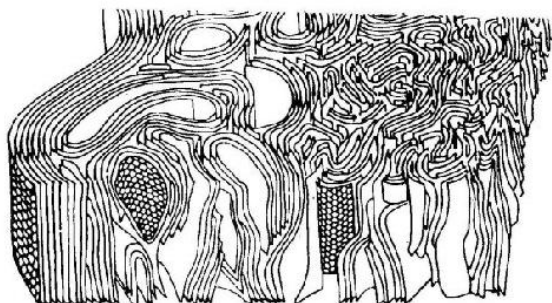
Obr. 5 Krystalová mřížka grafitu

Základem struktury uhlíkových vláken jsou pruhy uhlíkových atomů, vázaných vzájemně pomocí hybridizovaných sp^2 orbitalů s občasnými poruchami [1].

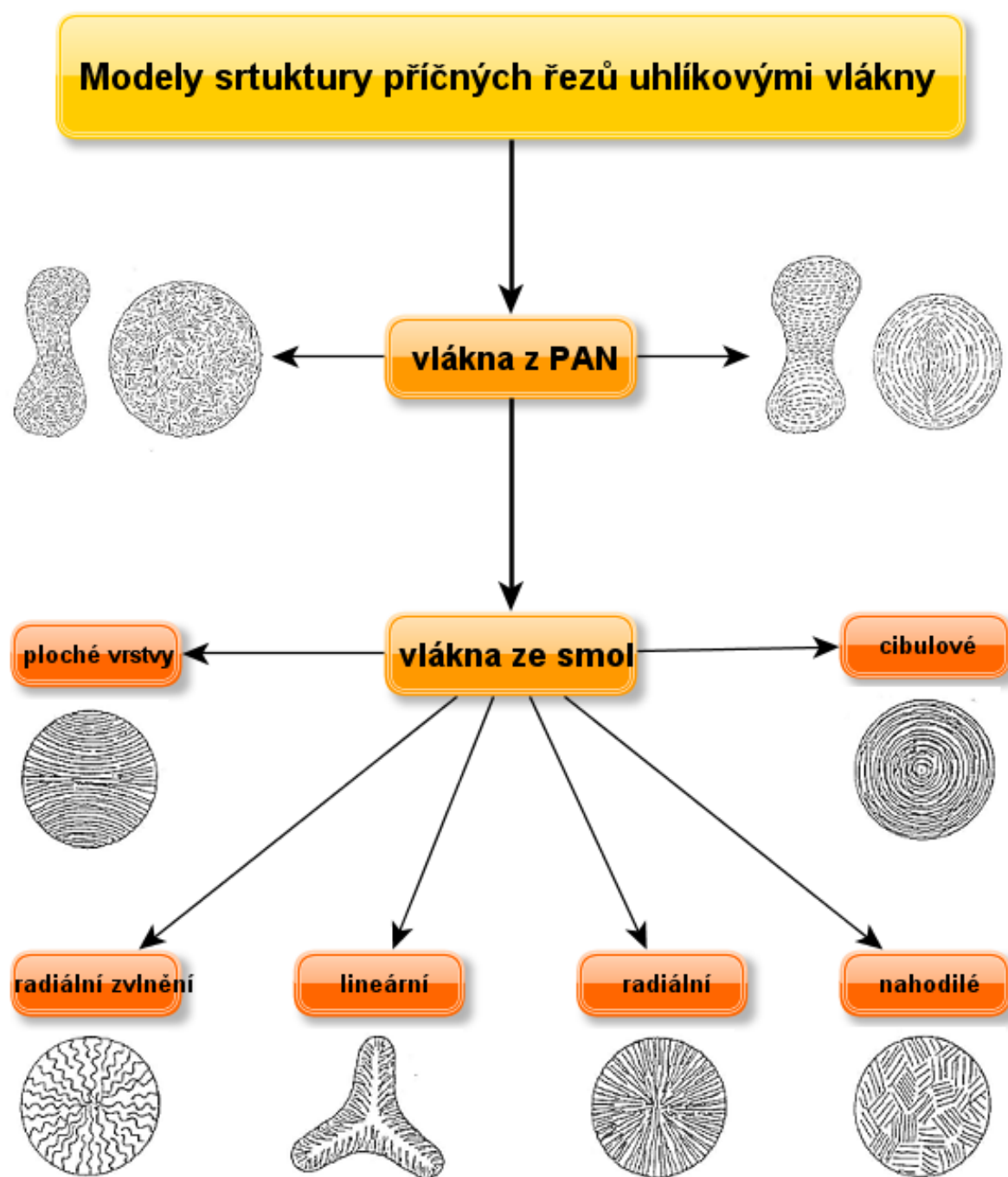
Nahodilé zprohýbání struktury (viz Obr. 7) projevující se při studiu struktury zřetelně vyšší hodnotou mřížkové konstanty získané ze širokoúhlého rozptylu RTG paprsků na uhlíkových vláknech se nazývá TURBOSTRACITITA (viz Obr. 8). Nepravidelnost struktury uhlíkových vláken způsobené poruchami v pruzích jejich zvlněním a nepravidelným spojováním okrajů pruhů vedou k turbostratickému uhlíku [1].



Obr. 7 Turbostratický uhlík



Obr. 8 Turbostratická struktura uhlíku - trojrozměrný model [1]



Obr. 9 Modely struktury příčných řezů uhlíkovými vlákny (1. řádek => vlákna z PAN;
2. a 3. řádek vlákna ze smol) [1]

3.2 Vlastnosti uhlíkových vláken

MODUL PRUŽNOSTI je elementární vlastností uhlíkových vláken. Chceme-li získat vlákna s vysokou tuhostí a rozměrovou stálostí, jsou pro výztuhu polymerních a různých jiných houževnatých matric ideální uhlíková vlákna s vysokým modulem pružnosti. Modul pružnosti má vlastnosti anizotropní (je to vlastnost, která označuje závislost na směru osy, tzn., že je rozdílný jak ve směru osy vlákna, tak ve směru kolmém na osu vlákna) [1].

Jeho hodnoty jsou v rozmezí 210 ~ 980 GPa. Dle modulu pružnosti můžeme rozdělit uhlíková vlákna na vlákna se standardním modulem pružnosti (210 - 250 GPa), středně modulová (Intermediate Modulus - IM) vlákna (280 - 350 GPa), vysokomodulová (Very High Modulus - VHM) vlákna (400 - 500 GPa) a vlákna s ultravysokým modulem pružnosti (Ultra High Modulus - UHM fibres) nad 500 GPa. Vlákna UHM jsou velmi drahá a používají se jen na speciální kosmické a vojenské aplikace (vlákna nejvyšších parametrů jsou od firmy Mitsubishi-vlákna DAILED a firma CYTEC Thermal Graph-K1100 s hodnotou modulu 965 GPa) [1, 15].

Modul pružnosti úzce souvisí s dokonalostí vnitřní stavby vláken, závisí na přednostní orientaci krystalitů nebo jejich mikrofibrální struktuře. Pro absolutně dokonalá uhlíková vlákna je teoretický modul pružnosti odvozený z pružnostních konstant monokrystalu grafitu, jeho hodnota se pohybuje kolem cca 1060 GPa. Uhlíková vlákna s ultravysokým modulem pružnosti dosahují více než 50% hodnot z absolutně dokonalých vláken a speciální vlákna s anizotropních mezofázových smol dosahují přes 80%. Hookův zákon platí pro uhlíková vlákna v plném rozsahu, tedy pro lineární závislost mezi napětím a deformací (prodloužením) vláken. Někteří autoři popisují i závislost mírného zvyšování modulu pružnosti na zvyšování napětí (tzv. strain stiffening effect). Je to vysvětlováno tím, že při osovém namáhání vláken dochází k určitému narovnání turbostraticky zvlněných mikrofibril ve struktuře vlákna [1].

PEVNOST uhlíkových vláken je dána dokonalostí jejich struktury a také velkou měrou povrchových defektů na vláknech.

Uhlíková vlákna lze podle pevnosti rozdělit na: uhlíková vlákna nižších parametrů, kde pevnost v tahu je < 1000 MPa (modul pružnosti v tahu < 100 GPa; vlákna se standardní pevností (2,5 - 4 GPa) a vlákna typu HS – (vysoce pevná) mají

pevnost 3,5 - 7 GPa, tažnost 1,7 - 2,4 % a modul pružnosti 235 - 300 GPa [1, 16].

Měření pevnostních charakteristik má pro uhlíková vlákna několik neobvyklých požadavků. Anizotropie a jemnost elementárních vláken může zapříčinit poškození při manipulaci a následně naměření nesprávných hodnot vlastností.

V podstatě existují 4 metody charakterizace pevnostních parametrů. Měření monofilů vyžaduje lepení monovláken na papírové rámečky, pečlivé umístění ve svěrkách trhacího stoje a velmi nízké rychlosti zatěžování. Nejvíce používaný způsob měření využívá svazkové pevnosti vláken spojených vysoce tažným pojivem. Předpokládá se, že se pojivo prakticky neúčastní přenosu napětí a pevnost se vyjadřuje na plochu průřezu použitého svazku vláken. Způsobem vyhodnocení mechanických vlastností může být i využití tahové nebo ohybové zkoušky jednosměrně uspořádaných kompozitních destiček se standardním pojivem a pevnost vlákna se stanoví na základě zákona směsí z objemového podílu vláken v kompozitu [1].

HUSTOTA je důležitou vlastností vláken. Hustota monokrystalického grafitu je 2255 kg/m^3 . Stupeň pórovitosti, struktura vláken a turbostratické uspořádání grafenových rovin poznamenává hustotu uhlíkových vláken. Je v rozsahu 1700 - 2200 kg/m^3 . Měření hustoty komplikují vysoké hodnoty měrného povrchu, uplývání vzduchu na vláknech a tím obtížné využití běžné pyknometrické metody. Můžeme využít hydrostatickou metodu dvojího vážení (na vzduchu a v kapalině o známé hustotě), pokud je vzorek vláken po vnoření do kapaliny vakuově odplyněn. Rozdíly v hustotě vláken potvrzují přítomnost poruch a tím se projevuje i odlišnost mechanických parametrů [1].

ELEKTRICKÁ VODIVOST je u uhlíkových vláken rovněž anizotropní. Je vysvětlována existencí delokalizovaných π -elektronů mezi grafenovými rovinami. Tzn., že čím dokonalejší bude uspořádání vnitřní struktury vláken v souladu s osou vlákna, tím vyšší bude jejich elektrická vodivost. Měrný odpor uhlíkových vláken (uváděný výrobcí) je $10^6 \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{m}$ při $t=25^\circ\text{C}$ [1, 17].

TEPELNÁ VODIVOST uhlíkových vláken má stejné podmínky jako u elektrické vodivosti, i když mechanismus vedení tepla je komplikovanější záležitostí. Rozpětí tepelné vodivosti je cca 5 (T300) ~ 1950 (Pyrograf I.) $[\text{W/m.K}]$ viz tabulky v příloze [1].

TEPELNÁ ROZTAŽNOST je zvláštností uhlíkových vláken. Rovnoběžně s osou vlákna je velmi nízká a u dokonale uspořádaných vláken má pro oblast do 300 °C dokonce záporné hodnoty [1].

3.3 Výroba uhlíkových vláken

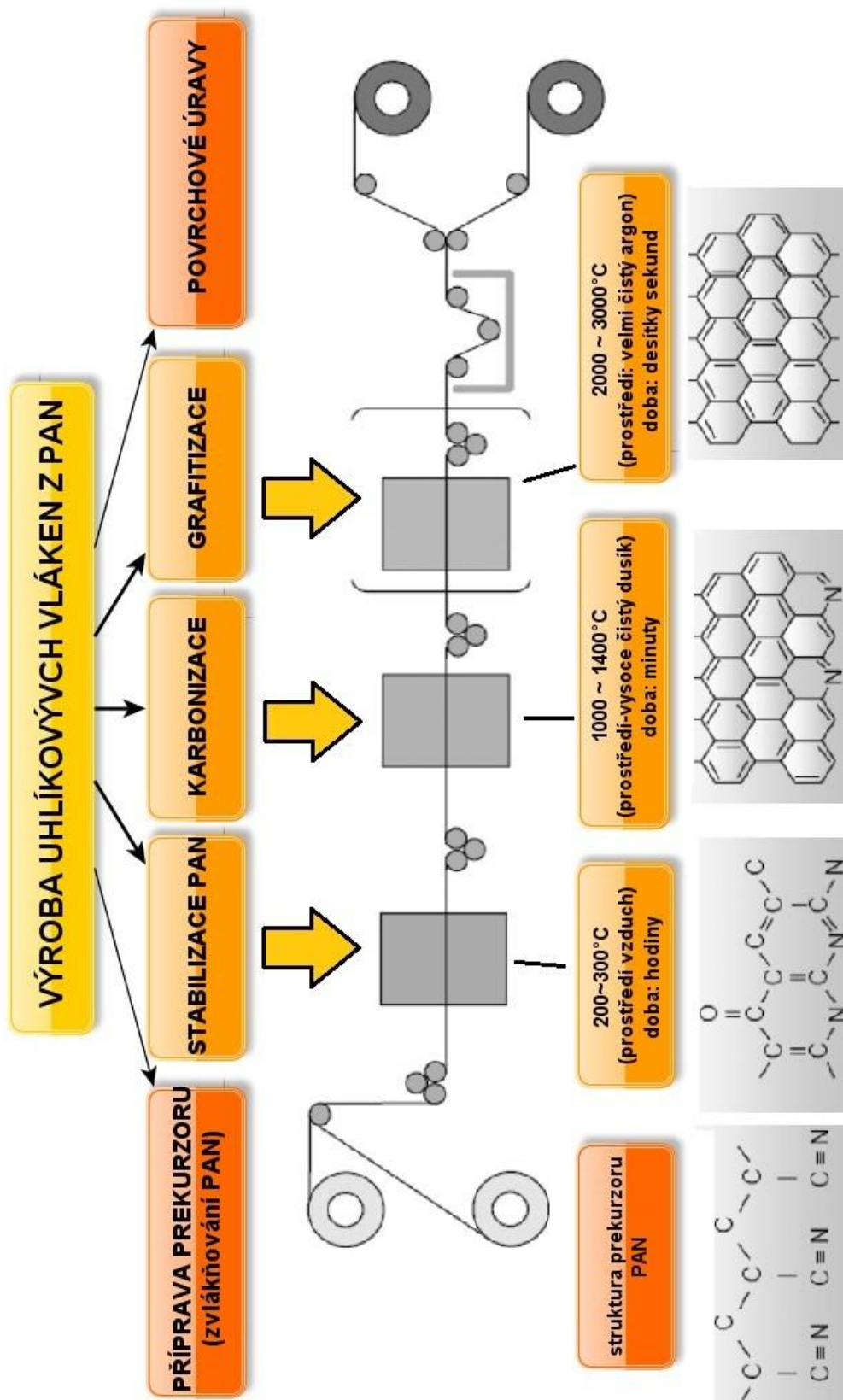
Surovina, která se používá k výrobě uhlíkových vláken, se nazývá prekurzor. Asi 90% uhlíkových vláken je vyrobeno z polyakrylonitrilových vláken (PAN). Zbývajících 10% je vyrobeno z viskóзовých vláken (př. firma Svetlogorsk „Khimvolokno“) nebo jsou vyrobena ze smol dehtu, které jsou zbytky po krakování ropy [18, 19].

Všechny tyto materiály jsou organické polymery, které jsou charakteristické dlouhými řetězci molekul spojených atomy uhlíku. Přesné složení každého prekurzoru se u jednotlivých výrobců liší a je považováno za výrobní tajemství [18].

Výroba vláken z viskózy má výtěžek uhlíkových vláken pouze 20 - 25 %, proto se téměř nepoužívají. Výroba z polyakrylonitrilových vláken má výtěžek 45 - 50 %. Nejvýhodnější je výroba ze smol, kde je výtěžek 75 - 80 %, a navíc lze připravit vysoce orientované struktury [20].

Pro výrobu nejtužších uhlíkových vláken se používá smol (zbytků po destilaci černého uhlí a ropy) a syntetických smol (syntetických kondenzovaných aromatických uhlovodíků). Vysoce tuhá a přitom pevná vlákna poskytují pouze tzv. mesofázové smoly (angl. “mesophase pitch”, MPP). V mesofázových smolách jsou aromatické roviny různé molekulové hmotnosti paralelně uspořádány, tj. i v tekuté smole jsou krystaly (tekuté krystaly) [21].

POSTUP VÝROBY UHLÍKOVÝCH VLÁKEN Z PAN je možno rozdělit do těchto etap: příprava prekurzoru, stabilizace, karbonizace, grafitizace a povrchové úpravy.



Obr. 10 Výroba uhlíkových vláken - schéma

STABILIZACE PAN vlákna se provádí při teplotách 200-300 °C, za působení tahového napětí, v oxidačním prostředí (vzduch). Exotermická reakce způsobí, že se barva vláken mění přes žlutou – oranžovou – okrovou – hnědou – až na černou. Dojde k cyklizaci vazeb v řetězci makromolekuly PAN (vytvoření paralelních žebříkovitých makromolekul) a k vzájemnému zesílení makromolekul kyslíkovými můstky. Vláknem při této etapě zčerná a stane se netavitelným. Z fyzikálních vlastností se mění ještě hustota (zvyšuje se). Mechanické vlastnosti se mění díky změně struktury, především snižováním tažnosti do přetržení, což je doprovázeno i snížením pevnosti v tahu. Pokud je zajištěno, aby se nezhoršila orientace struktury vlákna, tak nedojde ke značné změně modulu pružnosti. Tento proces trvá řádově hodiny [1, 21].

KARBONIZACE již stabilizovaných vláken probíhá při teplotách 1000-1400 °C v inertním prostředí (vysoce čistý dusík), aby nedošlo k poškození vláken oxidací. Ve vlákně proběhne karbonizace (odstraní se vodík a sníží se obsah dusíku a kyslíku atd.), vytvářejí se polykondenzované aromatické makromolekuly, které již z 50% hmoty tvoří uhlík. Díky strukturálním změnám ve vlákně se podstatně mění všechny fyzikální i mechanické vlastnosti vlákna. Vláknem dosáhne maximální pevnosti v tahu. Doba karbonizace trvá řádově minuty [1, 21].

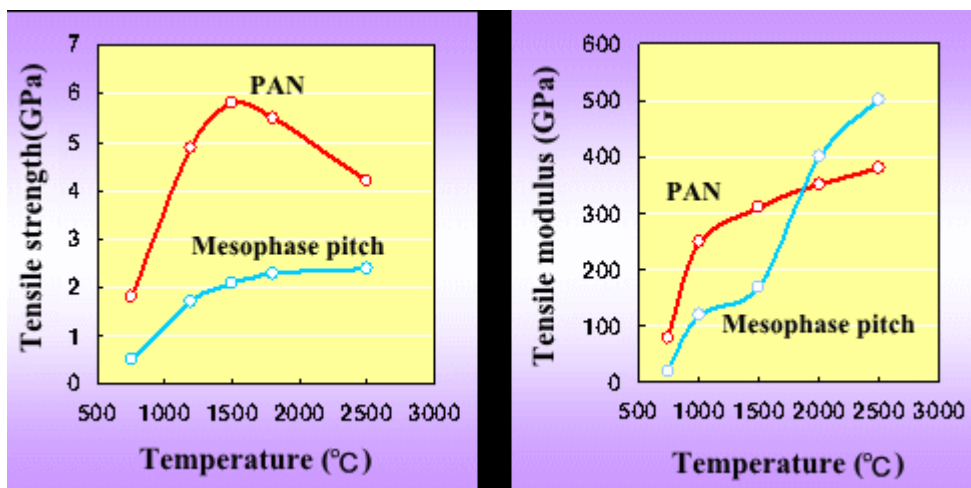
GRAFITIZACE probíhá při teplotách od 1400 do 3000 °C v inertním prostředí (velmi čistý argon nebo hélium). Dále se zvýší obsah uhlíku (protože se odštěpí poslední atomy dusíku vázané na strukturu vlákna), a umožní se vznik dokonalejších mikrokryсталů. Při působení vnějšího napětí (tahu) na gravitovaná vlákna, dojde ke zvýšení orientace vnitřní struktury, což způsobí zvýšení anizotropie tepelných, elektrických a mechanických vlastností, vzniknou tzv. vysokomodulová vlákna. Grafitizovaná vlákna obsahují více než 99% uhlíku. Grafitizace probíhá pouze několik desítek sekund [1, 21].

POVRCHOVÉ ÚRAVY uhlíkových vláken lze rozdělit do dvou fází. Nejdříve je třeba zvýšit povrchovou energii vláken, a pak vlákna preparovat tzv. „sizingem“, který chrání uhlíkové vlákno před poškozením, drží monofily v kábílku a současně usnadní pronikání pojiv k povrchu vláken a zajišťuje nejideálnější podmínky dalšího zpracování, buď do kompozit, nebo zpracovatelských útvarů.

Ke zvýšení povrchové energie se nejčastěji průmyslově používá elektrolytická

povrchová úprava, protože se nejlépe reguluje. Dochází ke zvětšení povrchu. Při elektrolýze je elektrické napětí řádově do desítek voltů, intenzita je regulována, aby nedocházelo ke zřetelnému odstraňování povrchových atomů uhlíku, což by způsobilo prohloubení defektů (snižovala by se mechanická pevnost vláken v tahu).

Sizing je nános tenké vrstvy (cca 1%) nevytvrzené epoxidové pryskyřice. Vláknem prochází emulzí nebo roztokem pryskyřice a je před navíjením sušeno. Toto platí pro vlákna určená na další zpracování pro epoxidová pojiva šetrnými zpracovatelskými technikami. Pro vlákna určená na sekání je nános sizingu několikanásobně vyšší [1].



Obr. 11 Vlastnosti uhlíkových vláken vyrobených z PAN, a z mezifázové smoly

3.4 Použití uhlíkových vláken



Obr. 12 Možnosti použití uhlíkových vláken

LETECTVÍ a KOSMONAUTIKA dala první podmět ke zkoumání a vývoji těchto materiálů. V tomto odvětví se uhlíková vlákna používají na trysky raket, konstrukční prvky draků a letadel (př. letadlo A380 - na výrobu se počítá se spotřebou 26 tun uhlíkových vláken), kosmický výtah, konstrukce satelitů vesmírných lodí, výztuhy, pohyblivé části, palubní mechanismy, lopaty motorů, radarovou techniku, na tlakové nádoby pro palivo, vrtule, sedačky, potahy atd.

STAVEBNICTVÍ je v dnešní době obohaceno o možnost použití uhlíkových pásků, tkanin nebo tyčí, které slouží ke zpevňování betonových, zděných a dřevěných konstrukcí namáhaných zejména ohybem, tahem a smykovými silami (příklad zpevnění mostů). Také je lze použít pro zlepšení elektrické vodivosti v podlahovinách atd.

Ve SROJÍRENSTVÍ mají uhlíková vlákna své přední místo pro textilní stroje, součástky s vratným pohybem, odstředivky, kluzné součásti, ozubená kola (výroba z krátkých vláken), tlakové nádoby, kartáčky elektromotorů, paže robotů atd.

ELEKTRONIKA využívá uhlíková vlákna pro výrobu čipů, pamětí, procesorů, podložek (které jsou elektricky a tepelně vodivé), elektronových tubusů, mimořádně malých tranzistorů. V neposlední řadě se z uhlíkových vláken vyrábí sluchátka, obaly na elektroniku (telefony, notebooky atp.).

Své významné místo mají uhlíková vlákna též ve VÝROBĚ ENERGÍ. Používají se pro výrobu listů větrných generátorů, turbín, jako sběrače elektrického proudu, nosiče solárních článků atd. Vědci zkoumají uhlík i jako zdroj elektrické energie. Pro svou vysokou absorpci dopadajícího světla (až 99,9%) může uhlík splňovat veškeré vlastnosti solárních panelů atd.

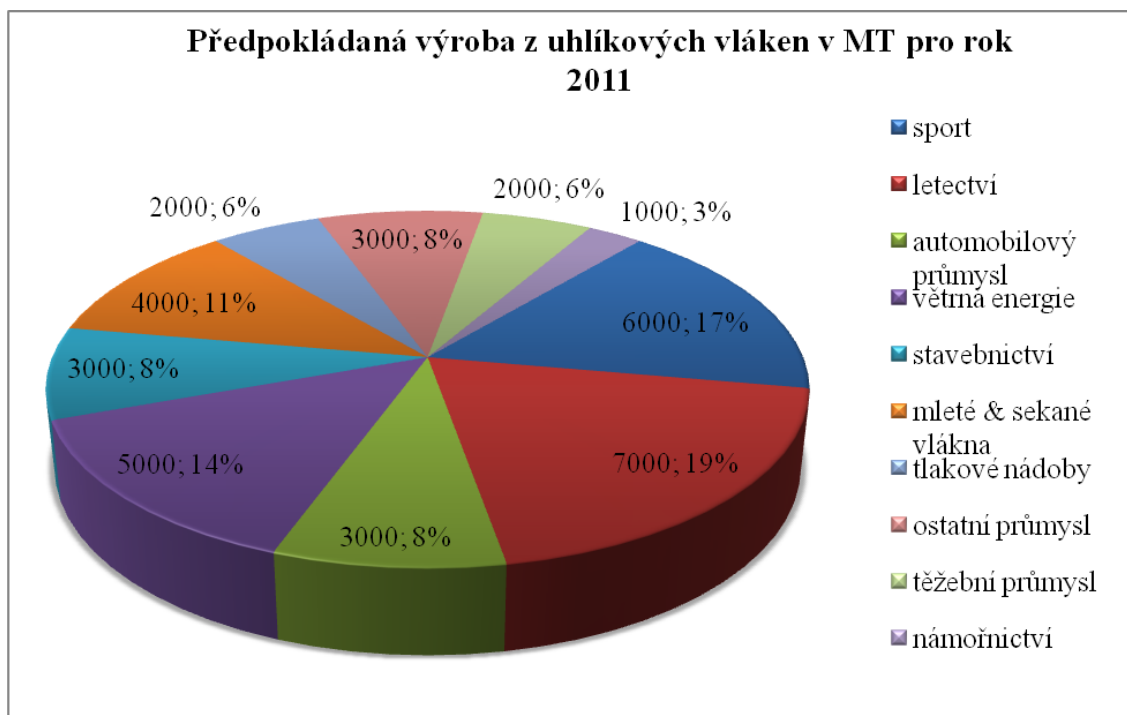
CHEMIE používá uhlíková vlákna pro laboratorní nádobí, materiál na uchování čistého vodíku, odstraňování statické elektřiny ze sklolaminátových konstrukcí, korozivzdornou tepelnou izolaci, filtry, korozivzdorné nádoby, těsnění, trubky, pinzety atd.

Ve ZDRAVOTNICTVÍ jsou uhlíková vlákna využívána zejména pro svou biokompatibilitu (kostní a kloubní náhrady, šlachy, protetika, krycí obvazy), pomáhají zabránit infekcím, léčit infekce, snižovat náklady na léčbu ran a podporovat jejich rychlejší vyhojení. Používají se také při výrobě různých speciálních přístrojů atd.

Vlastnosti uhlíkových vláken nám umožňují mnohá uplatnění i ve SPORTU. Používají se pro výrobu závodních člunů, závodních vozidel (př. Formule 1), motocross, části čtyřkolek, konstrukce jízdních kol a další součástky, tenisové a badmintonové rakety, pátky na stolní tenis, hokejové a golfové hole, lyže, běžecké a lyžařské hole, rybářské pruty. Uhlíkové trubky se používají na spojení křídel leteckých modelů a ocasních ploch atd.

DOPRAVA A AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL vyžaduje, díky své významné produkci, velmi dynamický vývoj. Uhlíkové vlákno je významné zejména v automobilovém průmyslu. Dříve bylo zcela nemožné vyrábět z těchto materiálů některé díly, natož celé konstrukce, při čemž v dnešní době, při snižování cen uhlíkových vláken, se některé automobilové závody rozhodly vyrábět z uhlíkových vláken i celé karoserie, palubní desky, zpětná zrcátka atd. (jedná se převážně o ruční výrobu). Zcela obvykle se vyrábějí například tyče náhonů, ojnice, pístní čepy, součásti brzd a brzdové obložení, listy per, těsnicí součásti atd. V lodní dopravě (nákladní, dopravní i sportovní lodě) díky velké odolnosti uhlíkových kompozitů vůči mořské vodě jsou využívána k výrobě výztuh, žeber, stožárů atd.

Jsou mnohá další využití uhlíkových vláken, která nelze specificky zařadit, jako např. neprůstřelné vesty, nože, hudební nástroje (př. housle, elektrické kytary), membrány reproduktorů, psací pera, módní doplňky (peněženky) atd.



Obr. 13 Předpokládaná poptávka odběratelů uhlíkových vláken v MT pro rok 2011

Na obrázku 13 vidíme předpokládané rozdělení uhlíkových vláken pro rok 2011. Lze pozorovat, že stále nejvýznamnější místo pro odběr uhlíkových vláken zastává stále rozvíjející se letecký průmysl. Jednou z nejdůležitějších je také využití ve větrné energii, kde se z uhlíkových vláken především vyrábějí listy větrných generátorů, toto odvětví se bude nadále využívat, protože zdroj větrné energie je ekonomický. V nynější situaci se stále více setkáváme s rostoucím využitím uhlíkových vláken, zejména v automobilovém průmyslu, i když mnohé vize jsou ještě stále v teoretických úvahách.

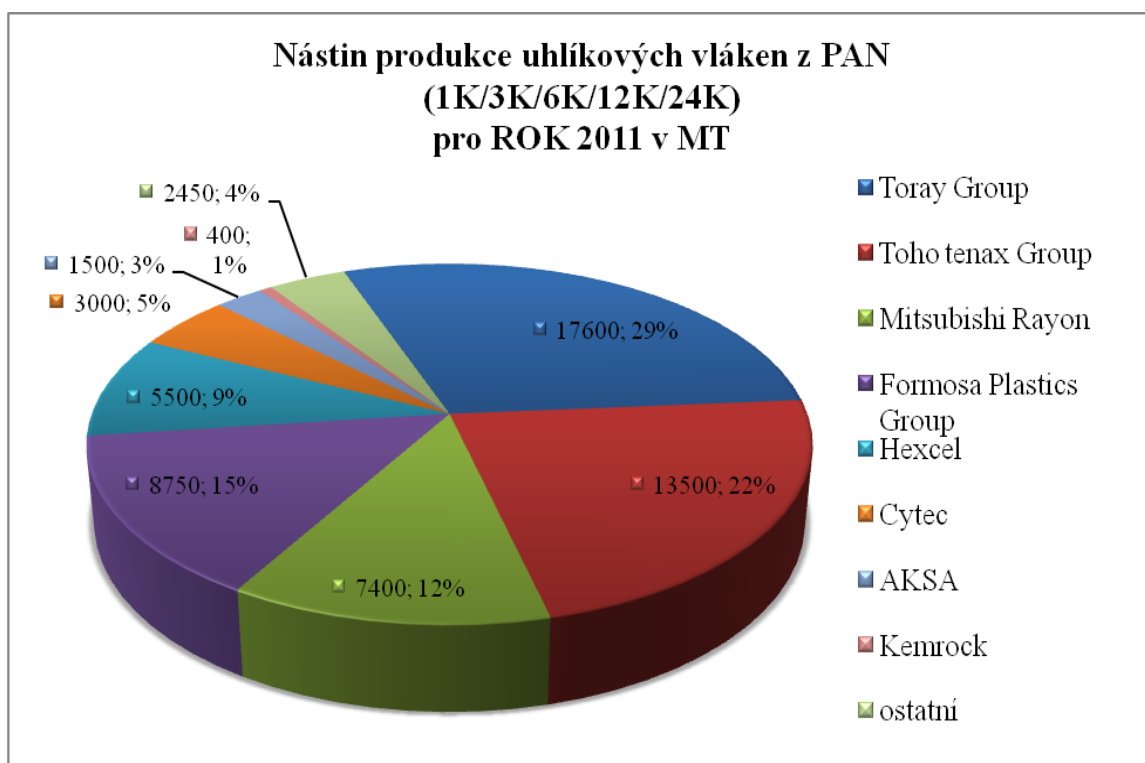
4. VÝZNAMNÉ FIRMY VYRÁBĚJÍCÍ UHLÍKOVÁ VLÁKNA

V nynější době se stále více rozšiřuje výroba uhlíkových vláken, a přibývá stále více firem, které tyto vlákna vyrábějí. Mnohé firmy jsou malé a jejich produkce je v celosvětovém měřítku výroby uhlíkových vláken zanedbatelná. Z tohoto důvodu jsou zde uvedeni pouze největší a nejvýznamnější světový výrobci. Z níže uvedené tabulky (Tabulka 1) je zjevné, že podstatná část výrobců uhlíkových vláken má sídlo firmy v Japonsku nebo USA. Je však nutné dodat, že téměř všechny firmy mají své kooperace rozmístěné po celém světě.

Tabulka 1 Přehled nejvýznamnějších firem vyrábějících uhlíková vlákna

| Název firmy | Sídlo firmy | Použité prekurzory |
|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| Toray Industries, Inc. | Tokyo, Japonsko | PAN |
| Toho Tenax Co., Ltd. | Tokyo, Japonsko | PAN |
| Mitsubishi Rayon Co., Ltd. | Tokyo, Japonsko | PAN |
| Mitsubishi Plastics, Inc. | Tokyo, Japonsko | smol |
| Formosa Plastics Group, Ltd. | New Jersey, USA | PAN |
| Hexcel Co., Ltd | Stamford, USA | PAN |
| Cytec Industries, Inc. | New Jersey, USA | PAN, smol |
| Aksa, Inc. | Istanbul, Turecko | PAN |
| Zoltek Co. Inc. | <i>St. Louis, USA</i> | PAN |
| SGL Group, Ltd. | Wiesbaden, Německo | PAN |
| Bluestar Fibres Company, Ltd. (18) | Peking, Čína | PAN |
| Nippon Graphite Fiber Co., Ltd | Tokyo, Japonsko | smol |
| Kemrock Industries and Exports, Ltd. | Gujarat, Indie | PAN |
| Pyrograf Products, Inc. | Ohio, USA | pary uhlovodíků |
| Svetlogorsk „Khimvolokno“ (16) | Svetlogorsk, Gomel. Bělorusko | viskóza |
| Kureha Chemical Inc. (17) | Tokyo, Japonsko | smol |
| Universal Carbon Fibres, Ltd. | West Yorkshire, V. Británie | smol |

4.1 Předpokládaná kapacitní produkce uhlíkových materiálů pro rok 2011



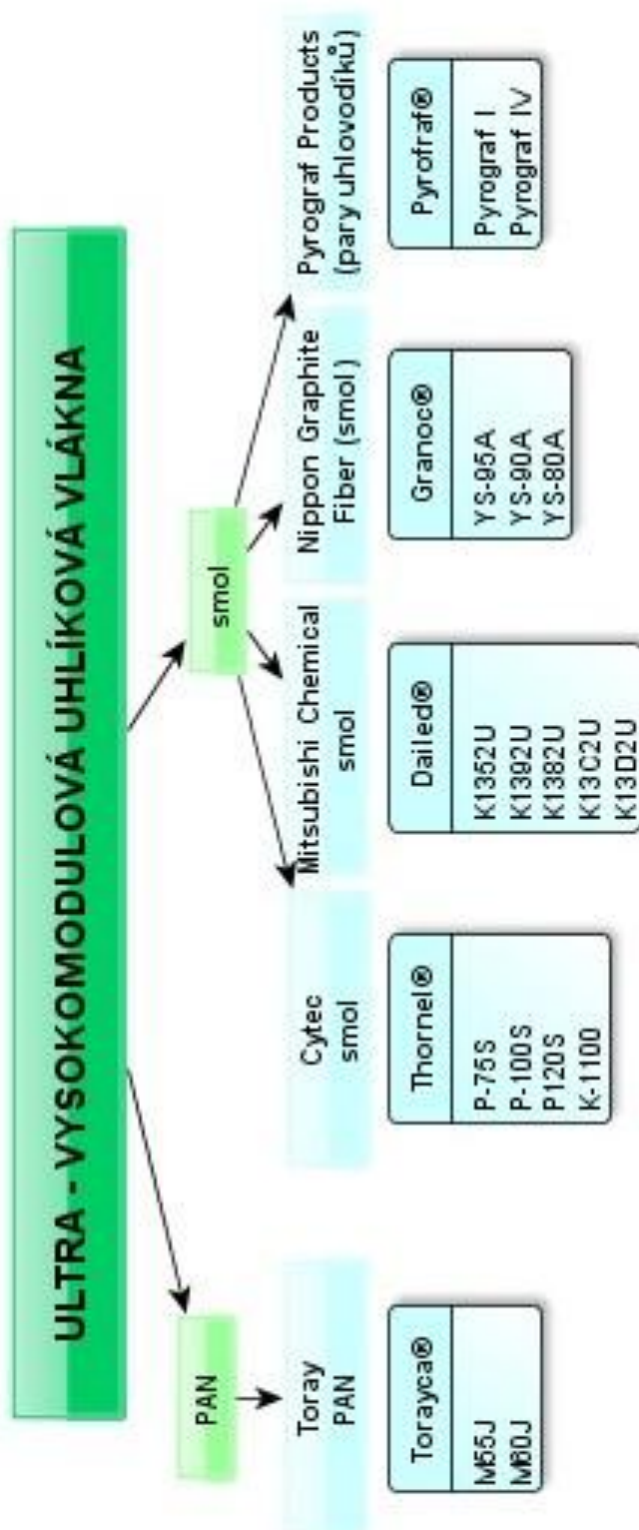
Obr. 14 Předpokládaná kapacita výroby uhlíkových vláken v MT pro rok 2011

Z obrázku 14, kde je graficky znázorněna předpokládaná výrobní kapacita uhlíkových vláken pro rok 2011 (hodnota je v přirovnání se skutečnou produkcí jen teoretická, většinou se násobí koeficientem 0,7). Je zjevné, že pět firem s největší produkcí uhlíkových vláken z PAN (pro malý počet vláken ve svazku), tvoří více než 85% celosvětové produkce tohoto typu vláken.

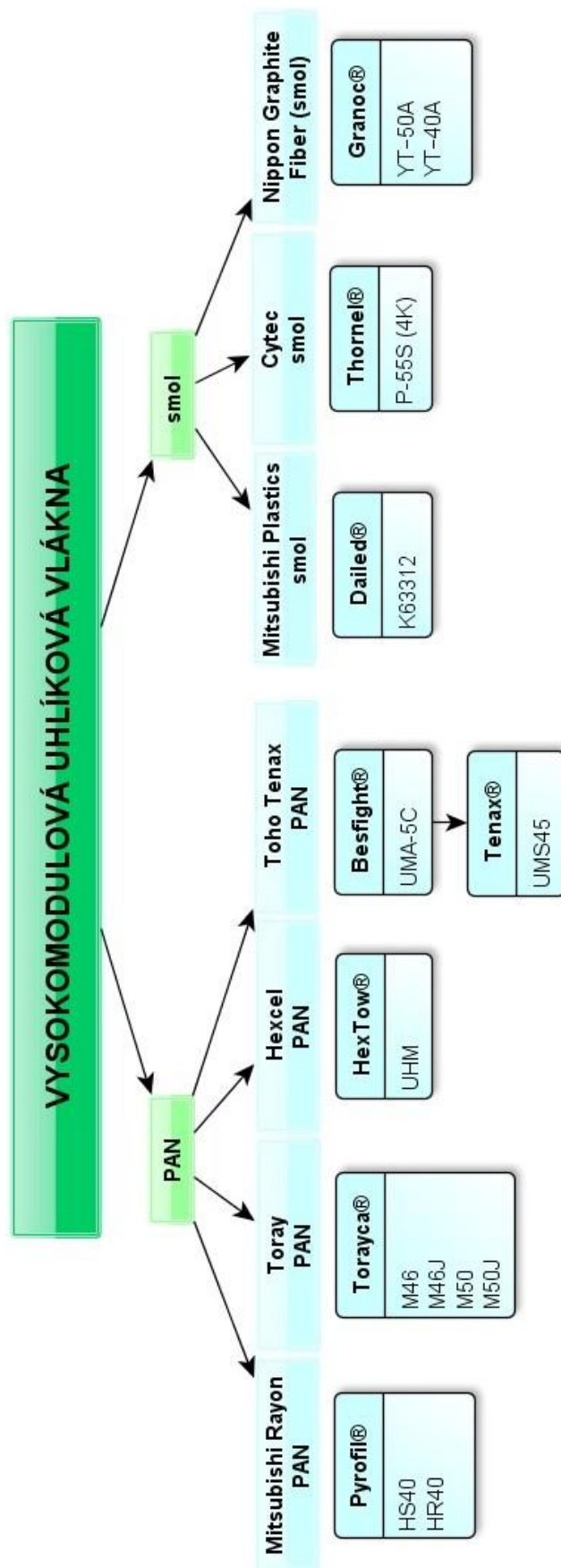
U výrobců vyrábějící uhlíková vlákna z PAN (24K, 48K, 50K, 60K, 80K, 320K,...) je předpokládaná kapacita výroby následovná. Firma Zoltek Group: 13000 MT, SGL Group: 6000 MT, Mitsubishi Rayon: 2700 MT, Bluestar: 2450 MT, Toray Group 300 MT.

Výrobci uhlíkových vláken na bázi smol mají předpokládanou kapacitu výroby následující: Nippon Graphite Fiber: 2400 MT, Mitsubishi Plastic: 1250 MT, Cytec: 400 MT [22].

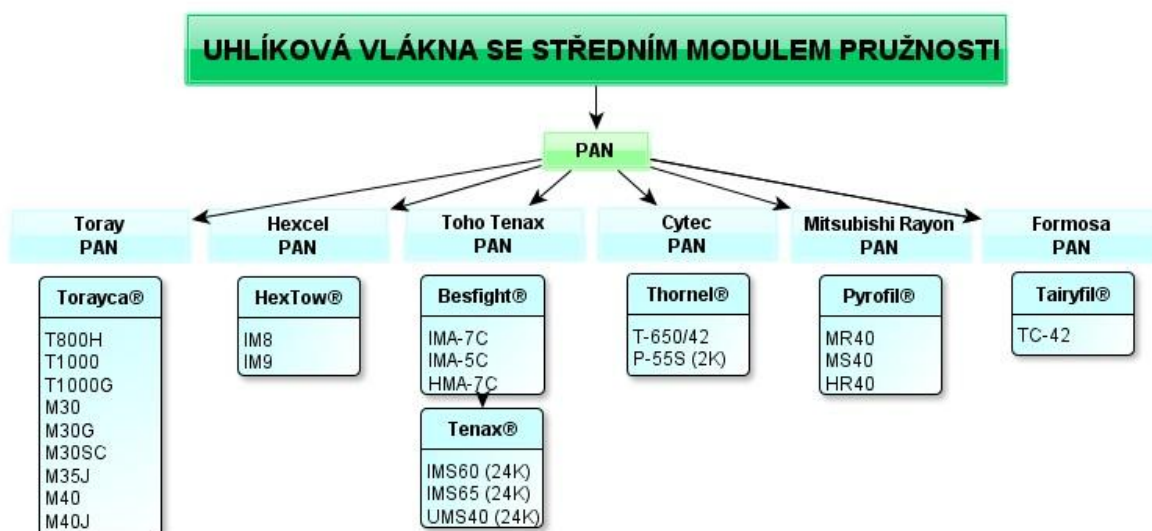
4.2 Rozčlenění výrobců uhlíkových vláken a jejich produkty



Obr. 15 Výrobci ultra-vysoko-modulových, uhlíkových vláken, a jejich typy vláken



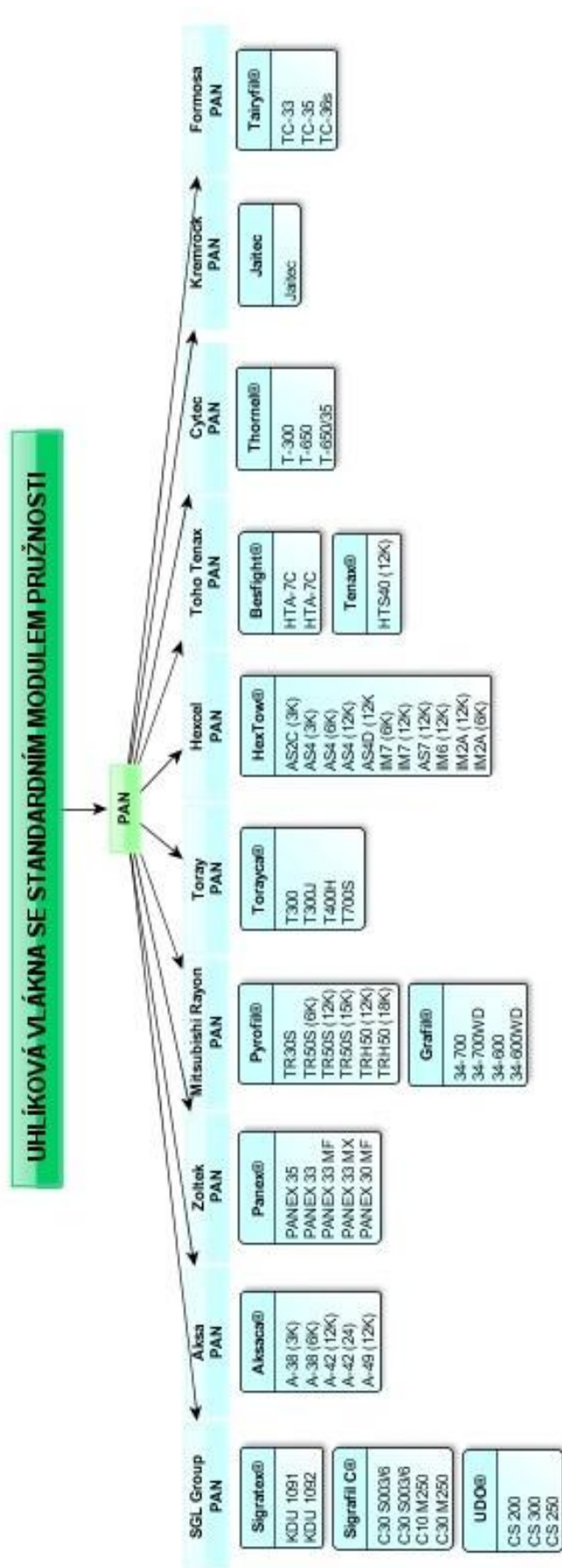
Obr. 16 Výrobci vysoko-modulových uhlíkových vláken, a jejich typy vláken



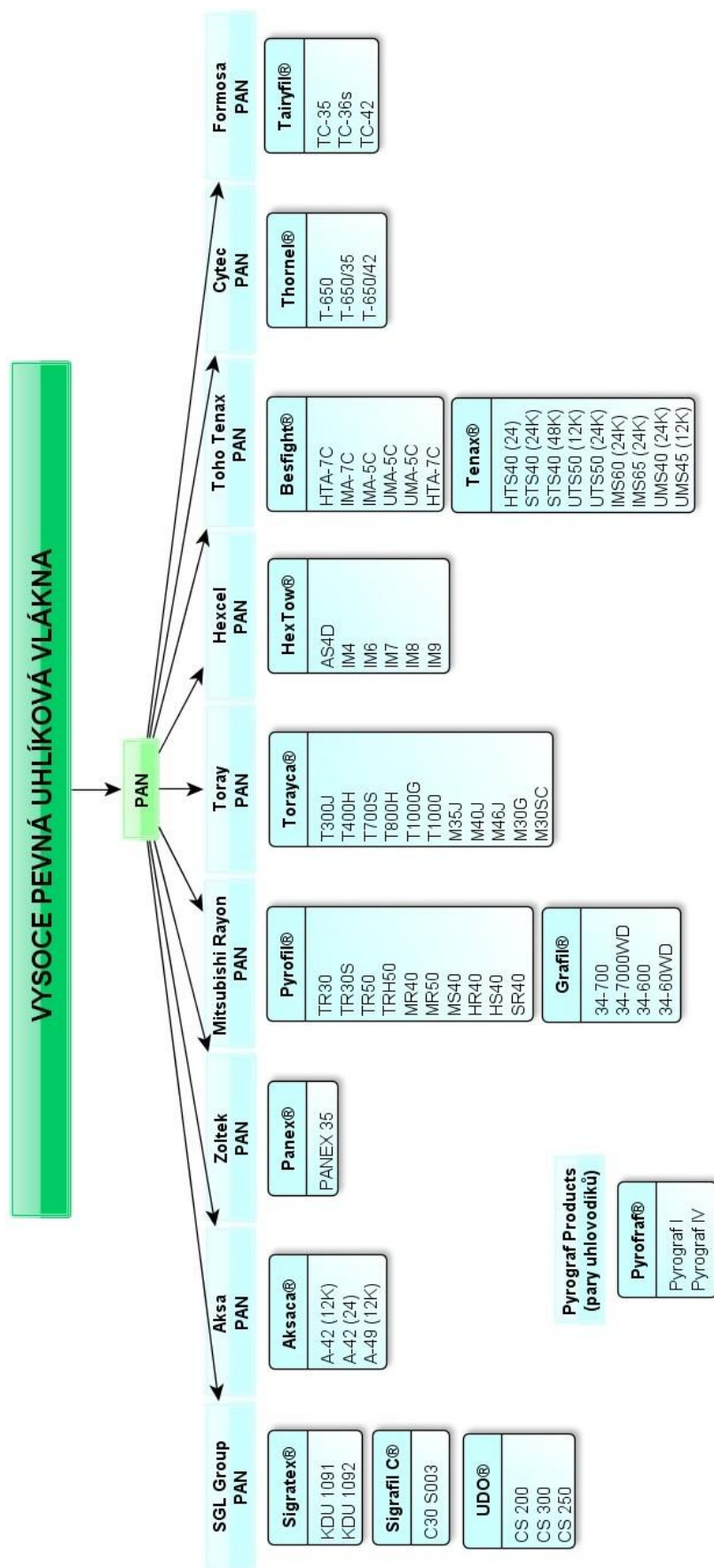
Obr. 17 Výrobci standardně-modulových uhlíkových vláken z PAN a jejich typy vláken



Obr. 18 Výrobci standardně-modulových uhlíkových vláken a jejich typy vláken ze smol



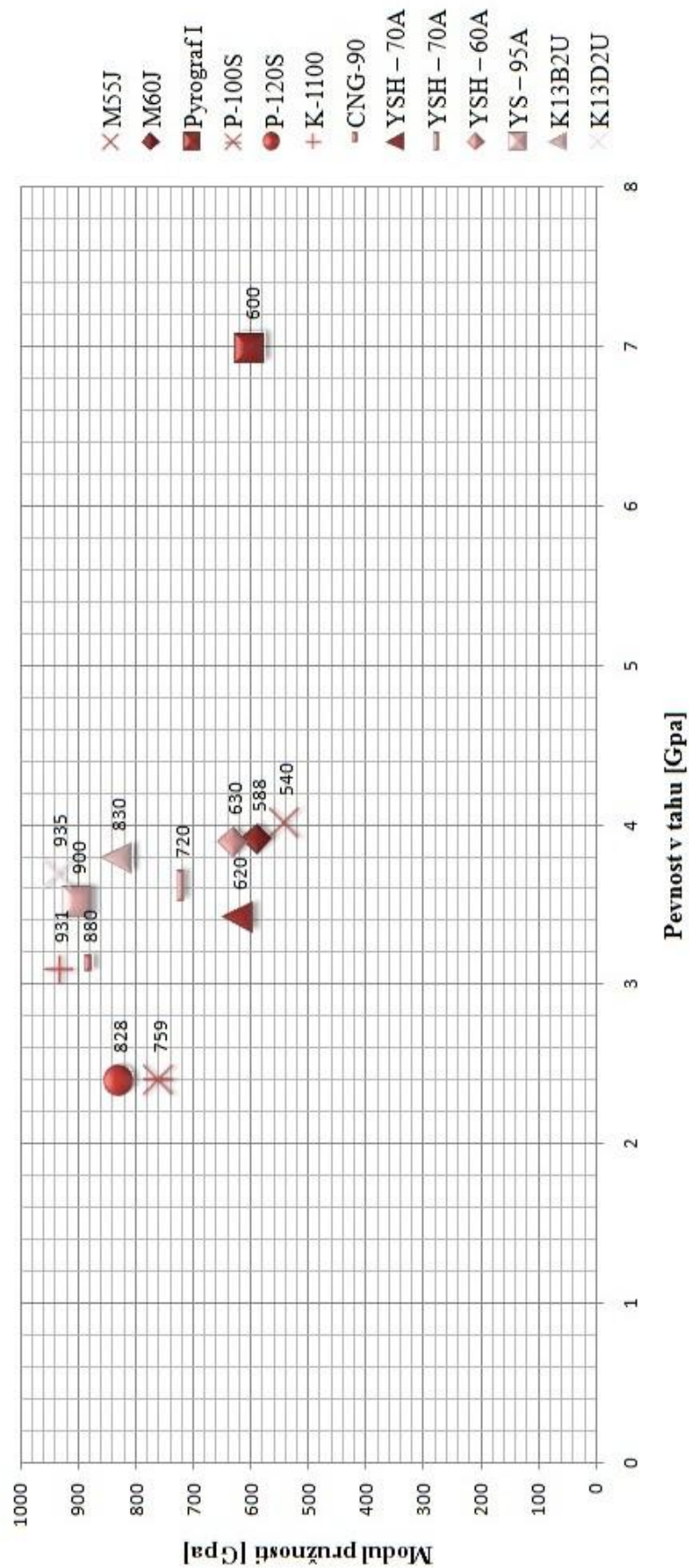
Obr. 19 Výrobci standardně-modulových uhlíkových vláken a jejich typy vláken z PAN



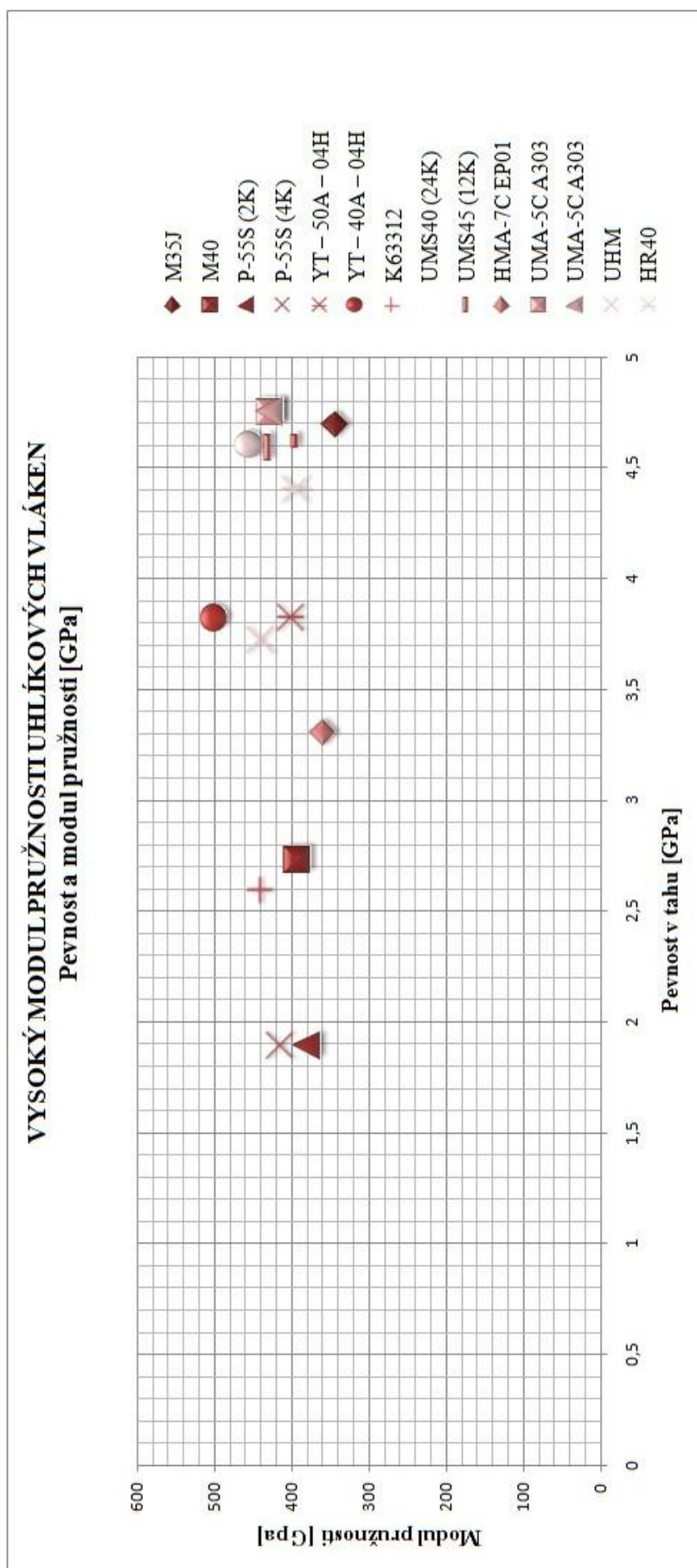
Obr. 20 Výrobci vysoko-pevnostních uhlíkových vláken a jejich typy vláken

ULTRA VYSOKÝ MODUL PRUŽNOSTI UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

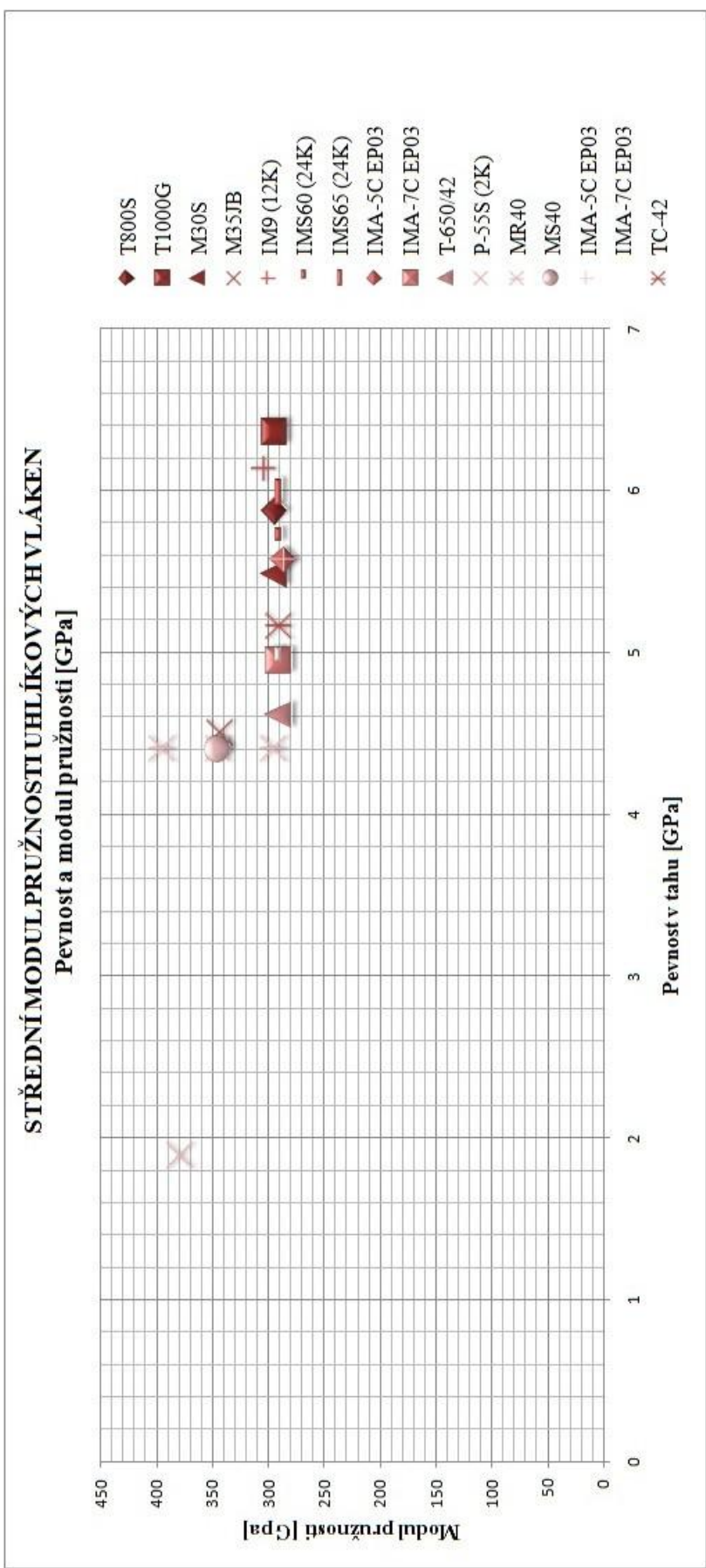
Pevnost a modul pružnosti [Gpa]



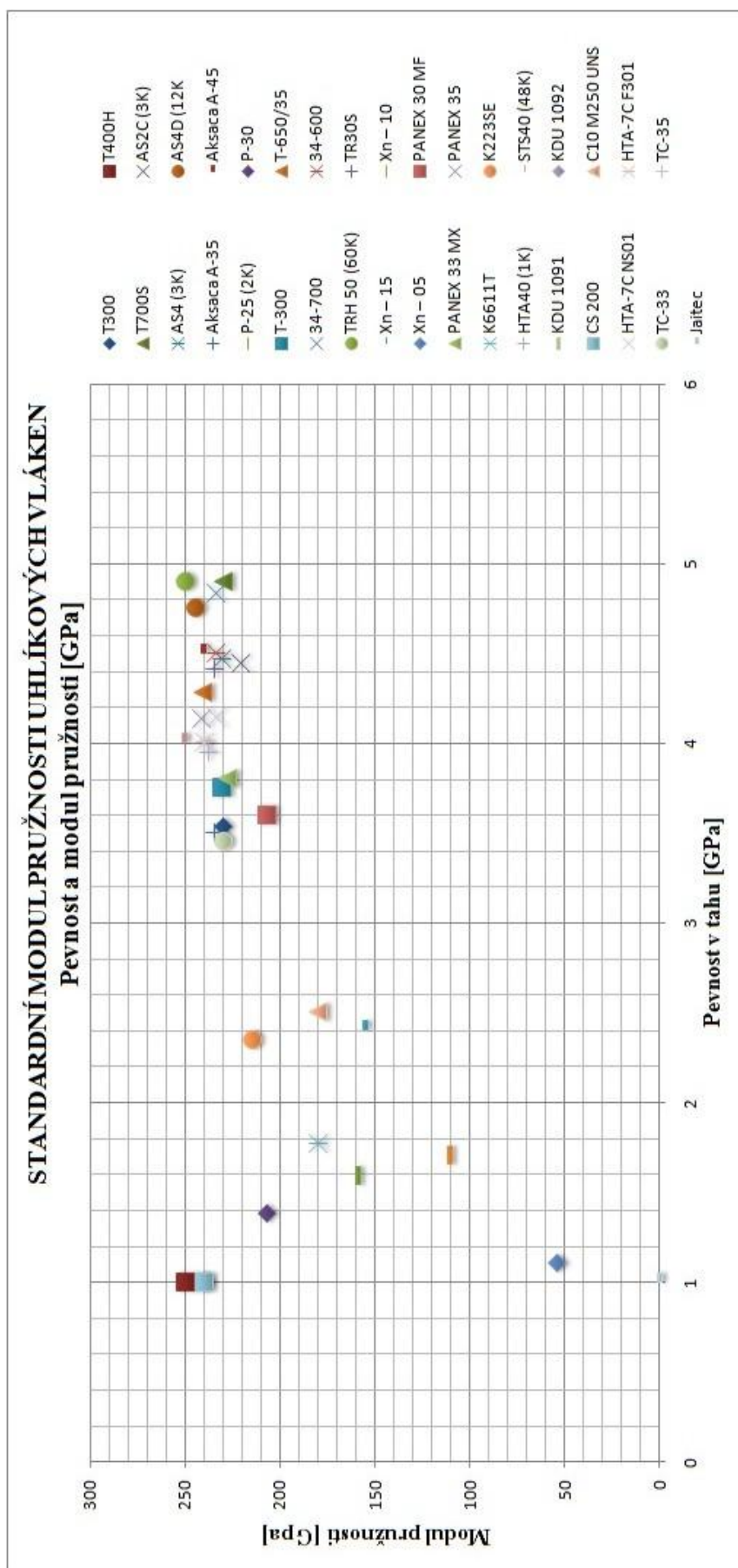
Obr. 21 Graf ULTRA-vysokomodulových uhlíkových vláken



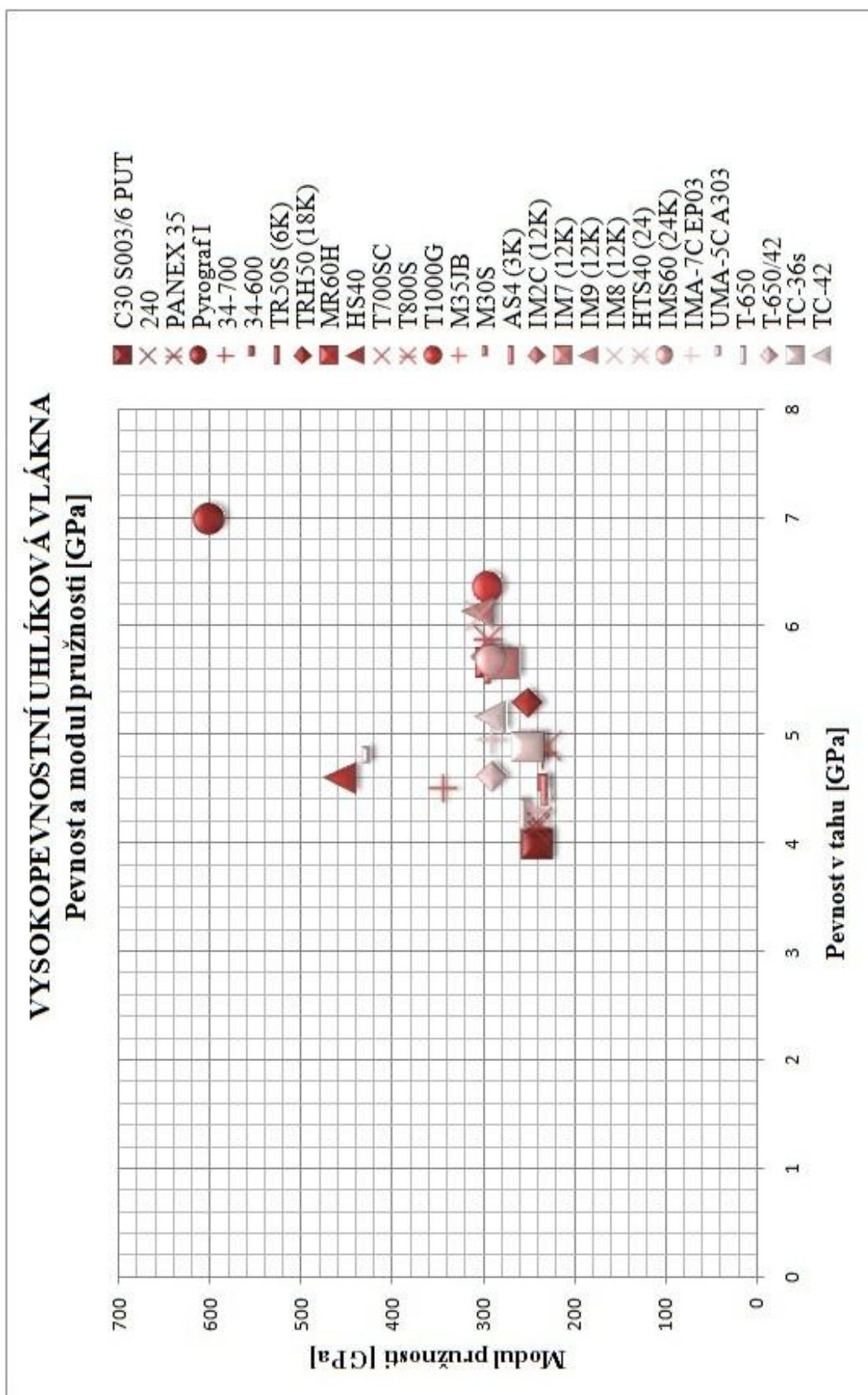
Obr. 22 Graf vysokomodulových uhlíkových vláken



Obr. 23 Graf středně modulových uhlíkových vláken



Obr. 24 Graf standardně modulových uhlíkových vláken



Obr. 25 Graf vysokopevnostních uhlíkových vláken

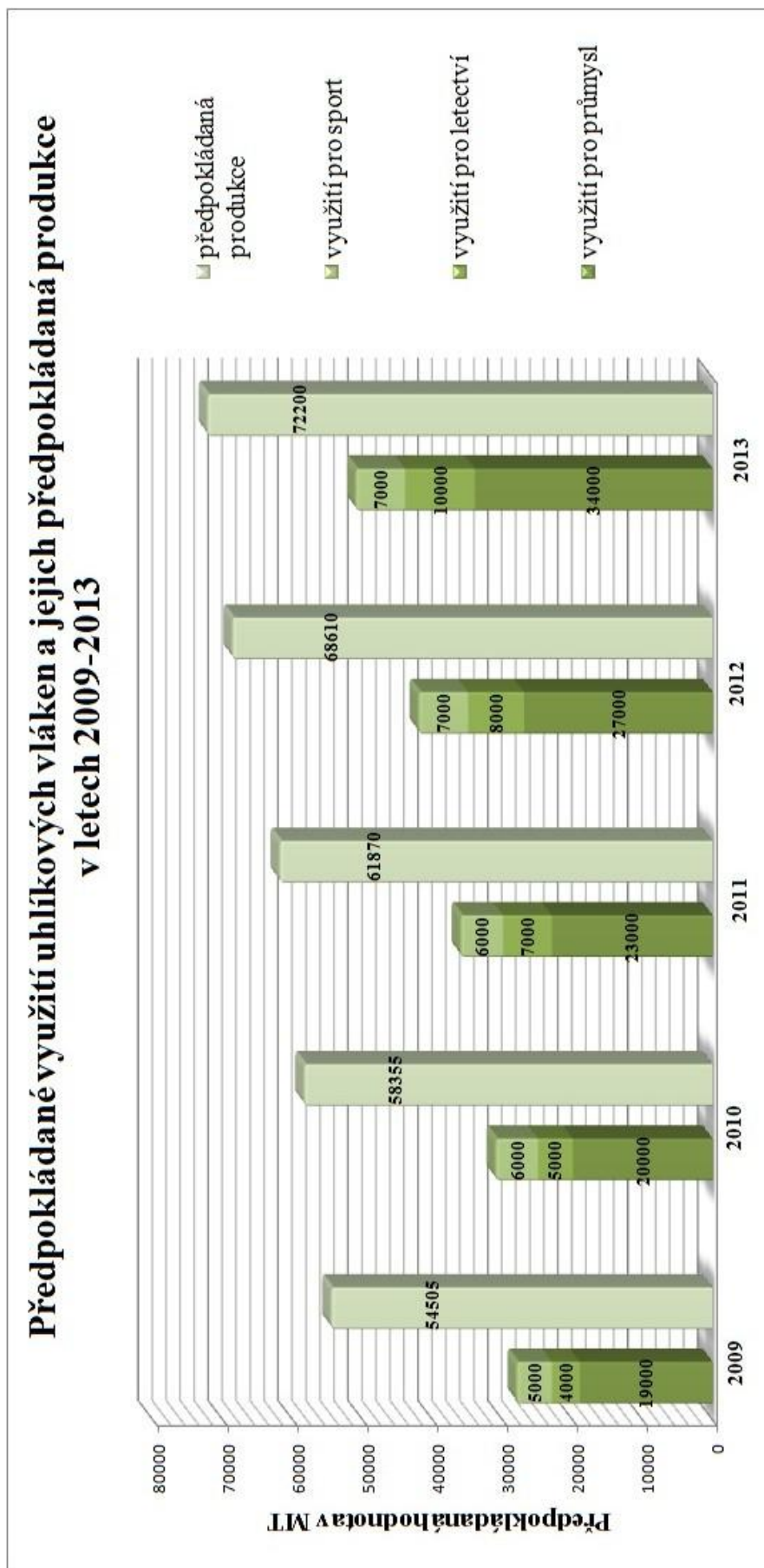
ULTRA-VYSOKOMODULOVÁ A VYSOKOMODULOVÁ UHLÍKOVÁ VLÁKNA mají specifické vlastnosti. Užívají se pro nejnáročnější aplikace kde je zapotřebí vysokého modulu pružnosti, a díky nízkému koeficientu tepelné roztažnosti (který je téměř nulový). Používají zejména pro kosmické účely.

STŘEDNĚ-MODULOVÁ UHLÍKOVÁ VLÁKNA byla původně vyvinuta pro letecký průmysl, kde měli splňovat především požadavky snížení hmotnosti a zachování pevnosti. Nyní se používá pro různé průmyslové aplikace a zejména jako tlakové nádoby. Tyto vlákna jsou v podstatě vysoko-pevnostní.

Vlákna se STANDARDNÍM MODULEM PRUŽNOSTI jsou nejběžnější uhlíková vlákna. Vlákna se používají v celé řadě průmyslových a rekreačních aplikací, sportu atd. Jelikož většina vláken s nižšími hodnotami modulu pružnosti mají vyšší pevnost, tak jsou tyto vlákna vhodná i na použití pro výrobu tlakových nádob. Též se používají řadu let pro letecký průmysl.

VYSOCEPEVNÁ UHLÍKOVÁ VLÁKNA je nejlépe použít pro účely, kde je zapotřebí velké pevnosti, tuhosti, kde se dosahuje velkého odporu. Příklad je pro použití na listy větrných elektráren, pro výrobu letadel a satelitů. Pro svou pevnost se používají se na výrobu tlakových nádob, na konstrukční prvky staveb, na zpevňování mostů. Tyto materiály dosahují téměř nejpevnějších materiálů na světě.

MLETÁ VLÁKNA se vyznačují vysokou pevností, modulem pružnosti a zároveň malou tloušťkou. Krátce řezaná uhlíková vlákna se používají především do termoplastů, aby zlepšila elektrickou vodivost a mechanické vlastnosti výrobků.



Obr. 26 Poměr předpokládané výroby uhlíkových vláken a jeho využití

Porovnáme-li předpokládanou produkci uhlíkových vláken s předpokládaným využitím (odběrem) zákazníků (hodnoty lze vyčíst z obrázku 21), tak je zjevný velký nepoměr využití. Jedná se o hodnoty, které jsou veřejnosti zveřejněny. Rozdíl mezi produkcí a spotřebou je nezanedbatelný. Je to zejména z důvodů velké nabídky firem vyrábějící uhlíková vlákna zákazníkům. Dodavatelé uhlíkových vláken nechtějí dát podnět zákazníkům, aby hledali jiné varianty materiálů pro své produkty [22].

Můžeme také pozorovat, jak je produkce a využití stoupající. Předpokládaný nárůst poptávky uhlíkových vláken pro rok 2015 je 67000 MT, z nichž se předpokládá, že 47000 MT bude na využití v průmyslu. Využití pro sport si zachovává pro rok 2015 konstantní hodnotu 7000 MT. Předpokládaný nárůst poptávky pro rok 2020 činí v odvětví průmyslu cca 110000 MT uhlíkových vláken, z něhož bude téměř polovina určena pro automobilový průmysl [22].

Nejaktuálnější prognóza globální produkce uhlíkových vláken je pro rok 2011 60.000 MT. Tato informace byla sdělena na světové konferenci uhlíkových vláken ve Washingtonu, která se konala v říjnu 2011. Této konferenci se zúčastnili mnozí delegáti předních firem, které jsou v této práci zmíněny. Předpokládaný růst výroby uhlíkových vláken se v roce 2014 odhaduje na 2,4 miliard dolarů [23, 24].

5. FINANČNÍ DOSTUPNOST UHLÍKOVÝCH VLÁKEN

Uhlíková vlákna začala být komerčně vyráběna okolo roku 1960. Na úplném začátku se cena uhlíkových vláken pohybovala v nepředstavitelných hodnotách 400 \$ až 500 \$ za libru. S rostoucí nabídkou uhlíkových vláken a snižováním nákladů na jejich výrobu klesá cena uhlíkových vláken. Z finančních důvodů se v dřívějších dobách, kdy byly téměř neuvěřitelné vlastnosti těchto vláken objeveny, se nadále díky nepředstavitelně vysoké ceně, používali uhlíková vlákna pouze ke speciálním účelům, jako jsou raketoplány, aeroplány. V tomto časovém období stála uhlíková vlákna 150 \$ / lb (cca 6200 Kč / kg). V dnešní době na výrobu klesly na 5 \$ / lb (cca 210 Kč / kg). Z tohoto důvodu může být, a je využívání uhlíkových vláken rozšířeno do mnoha odvětví. Můžeme se s nimi běžně setkávat v různých komponentech, které jsou vyráběny z uhlíkových vláken, a to zejména jako kompozita [24, 25].

Cenu uhlíkových vláken ovlivňuje mnoho aspektů. Především je to precursor, který ovlivňuje kvalitu uhlíkových vláken, ale taky počet monofilů ve svazku. Př. uhlíkové vlákno 12K (kabel, který obsahuje 12 000 podélně uspořádaných vláken - monofilů) bude v přepočtu dražší než vlákna 3K shodného modulu [26].

Nadále se v ceně projevují mechanické vlastnosti materiálů. Vlákna vysocepevná, která se vyrábí při teplotách cca kolem 1000 °C-karbonizací, budou levnější než vlákna vysokomodulová, která musí projít řádově o mnoho vyšší teplotou (kolem 2000-3000 °C-karbonizací a grafitizací), takže se u nich ušetří i další výrobní postup (tzn. cena za materiál i čas potřebný pro výrobu).

V níže uvedených tabulkách (tabulka 2, tabulka 3 a tabulka 4), jsou uvedeny typy uhlíkových vláken a jejich konkrétní ceny, nebo cenové rozmezí, které prodejci udávají.

Tabulka 2 Mletá a sekaná uhlíková vlákna a jejich cena na trhu [27-35]

| Typ uhlíkových vláken | Cena 1 kg materiálu |
|--|--------------------------|
| Mletá vlákna (smol) | US \$ 14 - 50 / kg |
| Mletá vlákna (PAN) | US \$ 28 - 38 / kg |
| Sekaná vlákna | US \$ 27 – 38 / kg |
| Sekané vlákno 12K TC36s (pro betonování) | RMB 16 – 20 / kg |
| Sekané vlákno | US \$ 22 – 30 / kg |
| Sekané vlákno | US \$ 14 – 14 / kg |
| Sekané vlákno | US \$ 22,92 – 26,69 / kg |
| Sekané vlákno | US \$ 15,2 – 30 / kg |
| Sekané vlákno | 3240 Kč / kg |

Tabulka 3 Délkové textilie z uhlíkových vláken a jejich cena na trhu [36-46]

| Typ uhlíkových vláken | Cena 1 kg materiálu |
|---|---------------------|
| Z PAN tow (1k, 3k, 6k, 12k) | US \$ 40-50 / kg |
| Z PAN TAILI (12k) | RMB 85 – 230 / kg |
| Uhlíkový roving Tenax HTA 40 E13 12K 800tex | 1232 Kč / kg |
| Uhlíkový roving Tenax HTA 40 E13 | 1872 Kč / kg |
| Uhlíkový roving Tenax IMS 5131 410tex f12000 t0 | 5544 Kč / kg |
| Uhlíkový roving Tenax IMS60 E13 24K 830tex | 2583,5 Kč / kg |
| Uhlíkový roving Tenax UMS 2526 800tex f24000 t0 | 3947 Kč / kg |
| Uhlíkový roving Tenax UTS50 F24 24K 1600tex D | 1196,5 Kč / kg |
| Uhlíkový roving T-800 24K - vysoký modul pevnosti | 1260 Kč / kg |
| Uhlíkový roving UMS 2526 800 tex | 4032 Kč / kg |

Tabulka 4 Plošné textilie z uhlíkových vláken a jejich ceny na trhu [47-54]

| Typ uhlíkových vláken | Cena za 1 m ² materiálu |
|--|------------------------------------|
| Uhlíková tkanina 120g/m ² plátno | 2534,5 Kč / m ² |
| Uhlíková tkanina 160 g/m ² - kepr 2/2 | 633,5 Kč / m ² |
| Uhlíková tkanina 280g/m ² satén | 1382 Kč / m ² |
| Uhlíková vlákna jednosměrná spojené mřížkou 250g/ m ² | 648 Kč / m ² |
| Uhlíková vlákna jednosměrná spojená mřížkou 30 g/ m ² , šíře 50 | 322 Kč / m ² |
| 1K tkanina 119g / m ² (1K) uhlíkové vlákno | US \$ 30 – 50/ m ² |
| Toray T300, Toho HTA (1k, 3k, 6k, 12k, 24k) | US \$ 10 – 80/ m ² |
| 3K Toray, 200g / m ² | US \$ 15 – 18 / m ² |

6. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo charakterizovat uhlíková vlákna z hlediska struktury a jejich užitných vlastností. Zjistit v jakých typech aplikací se vlákna používají a proč. Dále bylo úkolem provedení světového výzkumu s uhlíkovými vlákny (z důvodu zjištění firem, které se vyskytují na trhu a jaké typy uhlíkových vláken dodávají na trh). Krom toho bylo ještě zapotřebí porovnat vlákna jednotlivých výrobců z hlediska jejich užitných vlastností a ceny a doporučit, pro které technické aplikace jsou vhodná. Nedílnou součástí bakalářské práce bylo též provedení literární rešerše zabývající se daným tématem, která je uvedena v úvodu, na začátku publikace.

V této práci je nejprve představen předchůdce uhlíkových vláken – uhlík, nejprve v základních podobách, a pak i v jeho různých modifikacích. Druhá kapitola se již zabývá přímo uhlíkovými vlákny. Je zde popsána struktura uhlíkových vláken, jejich nejpřednější vlastnosti, pro které je uhlíkové vlákno výjimečné (zejména modul pružnosti a pevnost). Jsou zde zmíněny typy prekurzorů uhlíkových vláken a jejich výtěžnosti. Následně je zde pro názornost popsán nejběžnější způsob výroby uhlíkových vláken a jejich praktické využití. V třetí kapitole se práce zabývá již přímo výrobci. Jsou zde uvedeni největší světový výrobci uhlíkových vláken, druhy prekurzorů, ze kterých vlákna vyrábějí a typy vláken které dodávají na trh. Pro lepší názornost jsou následně výrobci i s jejich vlákny schematicky rozčleněny podle typu modulů pružnosti. Příklad jednotlivých vláken je graficky znázorněn dle daného uspořádání, jsou zde doporučení daných vláken pro konkrétní technické aplikace.

Ve čtvrté kapitole se bakalářská práce zabývá cenou uhlíkových vláken. V práci měla být provedena analýza cen jednotlivých uhlíkových vláken, kterou se nepodařilo uskutečnit. Firmy nebyly ochotny poskytnout informace týkající se cen svých výrobků z důvodu obchodního tajemství. Z těchto důvodů je zde popsán vývoj cen uhlíkových vláken, aktuální prognóza výroby, získaná z aktuálních informací, které byly prezentovány na technické konferenci zaměřené právě na uhlíková vlákna. Této konference se zúčastnili mimo jiné i hlavní představitelé výrobců uhlíkových vláken a jejich spotřebitelé (zejména z automobilového průmyslu), kteří značně ovlivňují nejen produkci, ale i cenu uhlíkových vláken. Jsou zde uvedeny ceny uhlíkových vláken v různých formách (mletá, sekaná vlákna, délkové a plošné textilie z uhlíkových vláken).

7. LITERATURA

- [1] Grégr, J.: *Uhlíková vlákna*, Liberec: TUL FP KCH, 2002
- [2] *Co je co – vaše encyklopedie* [online]. Vytvořeno 2000-11-26 [cit. 2002-09-01].
Dostupné na World Wide Web:
<http://www.cojeco.cz/index.php?s_term=&s_lang=2&detail=1&id_desc=387724>
- [3] Honza, J., Mareček, A.: *Chemie pro čtyřletá gymnasia – 1. Díl* (3. opravené vydání), Olomouc: Nakladatelství Olomouc, 1998. 124 pp ISBN 80-7182-055-5
- [4] Vávra, V., Losos, Z.: Učebnice mineralogie, *Ústav geologických věd*, Přírodovědecká fakulta Masarykova univerzita, Brno. [online] [2011-11-09]
Dostupné na WWW:
<www.sci.muni.cz/mineralogie/kap_4_2_mechan/kap_4_2_mechan.htm>
- [5] Duchárek, P., Šmídová, H.: *Chemie pro FST - Západočeská univerzita v Plzni* [online]. [2007-10-18]. Dostupné na World Wide Web:
<http://chemie.zcu.cz/Prednasky%20a%20prislusenstvi/CH_Kombinovane%20Studium%202011_12/Blok3_KS2011.ppt>
- [6] Křivka, B.: GRAFEN - forma uhlíku využitelná ve SPINTRONICE, *Toscali-věda-technika* [online]. [2011-10-24]. Dostupné na WWW:
<<http://toscali-veda-technika.blogspot.com/2011/10/grafen-forma-uhliku-vyuzitelna-ve.html>>
- [7] Daniš, S.: Nobelova cena za fyziku - výzkum grafenu, *Katedra didaktiky fyziky MFF UK v Praze* [online]. [2010-10-09] Dostupné na WWW
<<http://fyzweb.cz/clanky/index.php?id=155>>
- [8] kolegium: Prvky IV. A skupiny, *Projekt: Inovace oboru Mechatronik pro Zlínský kraj*, [online]. [2011-04-23]. Dostupné na WWW:
<<http://coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=20926&instance=2>>
- [9] Košťáková, E., Chvojka.: Uhlíkové nanotrubice - Rozdělení, struktura, *KNT, FT, TU* [online]. [2011-03-31]. Dostupné na WWW:
<http://www.ft.vslib.cz/depart/knt/web/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=171&Itemid=36>
- [10] Grégr, J.: Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken, *Zpráva pro Výzkumné centrum „Textil“ LN00B090*, TUL-FP [online]. [2004-10]. Dostupné na WWW:
<[http://www.centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1_zaverecne_zpravy/\[3](http://www.centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1_zaverecne_zpravy/[3)

1.09].pdf>

- [11] Těsnění přírubových spojů, *ŠKODA JS a. s.* [online]. Dostupné na WWW:
<<http://www.skoda-js.cz/cs/vyrobky-a-sluzby/zarizeni-pro-jaderne-elektrarny-typu-vver-a-rbm/tesneni-prirubovych-spoju.shtml>>
- [12] redakční rada: Mařík, I., Petrýl, M. Kuklík, M. a další: Pohybové ústrojí, ročník 9, 2002, číslo 1+2, Pohybové ústrojí. *Pokroky ve výzkumu, diagnostice a terapii*, ISSN 1212-4575 [online]. [2002]. Dostupné na WWW:
<http://www.pojivo.cz/pu/PU_12_2002.pdf>
- [13] Kratochvíl, B., Švorčík, V., Vojtěch, D.: *Úvod do studia materiálů*, (1. vydání), Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha, 2005, ISBN 80-7080-568-4
- [14] Vojáček, A.: Superkondenzátor – princip, vlastnosti, použití, *Automatizace – rady a poslední novinky z oboru* [online]. [2006-12-26]. Dostupné na WWW:
<<http://automatizace.hw.cz/clanek/2006122601>>
- [15] Grégr J.: Uhlíková vlákna, MONOKRYSTALY, Sborník Muzea Českého Ráje, Acta Musei Turnociensis 2005, svazek 1, (vydalo MČR Turnov, edit. T. Řídkošil), str. 107-119, ISBN 80-239-6435-6
- [16] Typy vláken, *ELLRI, s.r.o. výrobce kompozitních dílů* [online]
Dostupné na WWW <http://www.ellri.cz/vyroba_na_zakazku/typy_vlaken.htm>
- [17] Maršálková, M., Ledrová, Z., spolsin, spol. s.r.o.: Závěrečná práce, Dílčí projekt: Textilie pro speciální aplikace (1. Etapa: Mariérové textilie), *TUL-FT*, Výzkumné centrum Textil, [online]. Dostupné na WWW:
<[http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1_zaverecne_zpravy/\[3.1.01\].pdf](http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1_zaverecne_zpravy/[3.1.01].pdf)>
- [18] How ist Carbon Fiber Made?, *ZOLTEK – Commercial Carbon Fiber* [online]. Dostupné na WWW:
<<http://www.zoltek.com/carbonfiber/how-is-it-made/>>
- [19] Our Certificates, Sohim (SPA “Khimvolokno”), [online]. [2005]. Dostupné na WWW: <<http://www.sohim.by/en/about/>>
- [20] Militký, J.: Nepolymerní vlákna, *Speciální vlákna - 9. nepolymerní vlákna*, Technická univerzita Liberec, [online]. Dostupné na WWW:
<https://skripta.ft.tul.cz/database/list_pre.cgi?predmet=233&skripta=29&pro=>>
- [21] Kořínek: Vlákna pro kompozity, [online]. Dostupné na WWW:
<<http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>>
- [22] Carbon fibres: great opportunities but a lot of challenges, *JEC Composites*

- Magazine*, focus: carbon, [online]. (Str. 18-21) [06-2011]. Dostupné na WWW:
<http://www.nxtbook.fr/newpress/jecomposites/jcm1105_65/index.php>
- [23] Ali Kleiman: Go Carbon Fiber 2011 Day one, *Carbon Fiber Gear* [online] [06-10-2011]. Dostupné na WWW:
<<http://www.carbonfibergear.com/go-carbon-fiber-2011-day-one/>>
- [24] Dave P.: Carbon Fiber market expected to reach \$ 2,4 billion 2014, *Carbon Fiber Gear* [online] [26-05-2009]. Dostupné na WWW:
<<http://www.carbonfibergear.com/carbon-fiber-market-expected-to-reach-24-billion-in-2014/>>
- [25] The High-Performance Fiber Industries, *Committee on High-Performance Structural Fibers for Advanced Polymer Matrix Composites*, [online]. [2005] Dostupné na WWW:
<http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=11268#description>
- [26] Tood J., What Is Carbon Fiber Cloth?, *Composites / Plastics* [online] Dostupné na WWW:
<<http://composite.about.com/od/aboutcarbon/a/What-Is-Carbon-Fiber-Cloth.htm>>

WEBOVÉ ODKAZY CEN UHLÍKOVÝCH VLÁKEN:

- [27]<http://www.alibaba.com/product-gs/470562585/milled_Pitch_based_carbon_fiber.html>
- [28]<http://www.alibaba.com/product-gs/508484174/Milled_carbon_fiber.html>
- [29]<http://www.alibaba.com/product-gs/467374377/Carbon_Fiber_Chopped_Strand.html>
- [30]<http://www.alibaba.com/product-gs/381953060/12K_TC36S_chopped_carbon_fiber_for.html>
- [31]<http://www.alibaba.com/product-gs/307003589/chopped_carbon_fiber.html>
- [32]<http://www.alibaba.com/product-gs/296206814/chopped_carbon_fiber.html>
- [33]<http://www.alibaba.com/product-gs/501621883/chopped_carbon_fiber_short_carbon_fiber.html>
- [34]<http://www.alibaba.com/product-gs/399496949/Chopped_strands_Carbon_Fiber_Short_Carbon.html>
- [35]<<http://www.havel-composites.com/shop/32-Uhlikovy/2747-Uhlikova-vlakna-sekana-3mm.html?pls=0>>
- [36]<http://www.alibaba.com/product-gs/456382563/Best_Carbon_Fiber.html>
- [37]<http://www.alibaba.com/productgs/374997187/TAILI_carbon_fiber_12k_carbon_fiber.html>
- [38]<<http://www.havel-composites.com/shop/32-Uhlikovy/17-Uhlikovy-roving--Tenax-HTA-40-E13--12K--800tex.html?pls=0>>
- [39]<<http://www.havel-composites.com/shop/32-Uhlikovy/19-Uhlikovy-roving--Tenax-HTA-40-E13-3K-200tex.html?pls=0>>
- [40]<<http://www.havel-composites.com/shop/32-Uhlikovy/18-Uhlikovy-roving--Tenax-HTA-40-E13-6K-400tex.html?pls=0>>
- [41]<<http://www.havel-composites.com/shop/32-Uhlikovy/21-Uhlikovy-roving--Tenax-IMS-5131-410tex-f12000-t0.html?pls=0>>
- [42]<<http://www.havel-composites.com/shop/32-Uhlikovy/24-Uhlikovy-roving--Tenax-UMS-2526-800tex-f24000-t0.html?pls=0>>
- [43]<<http://www.havel-composites.com/shop/32-Uhlikovy/16-Uhlikovy-roving--Tenax-UTS50-F24--24K-1600tex-D.html?pls=0>>
- [44]<<http://www.havel-composites.com/shop/32-Uhlikovy/3241-Uhlikovy-roving-T-800-24K---vysoky-modul-pevnosti-.html?pls=0>>

- [45]<<http://www.havel-composites.com/shop/32-Uhlikovy/2060-Uhlikovy-roving-UMS-2526--800-tex.html?pls=0>>
- [46]<<http://www.havel-composites.com/shop/44-Klasicke/2331-Multi-Carbon-200gmspan-stylefont-size-8pxsup2supspan-090-uhlikova-prosita-tkanina.html?pls=0>>
- [47]<<http://www.havel-composites.com/shop/44-Klasicke/410-Uhlikova-tkanina-120gmspan-stylefont-size-8pxsup2supspan-platno.html?pls=0>>
- [48]<<http://www.havel-composites.com/shop/44-Klasicke/142-Uhlikova-tkanina-160-gmspan-stylefont-size-8pxsup2supspan---kepr-22.html?pls=0>>
- [49]<<http://www.havel-composites.com/shop/44-Klasicke/931-Uhlikova-tkanina-280gmspan-stylefont-size-8pxsup2supspan-saten.html?pls=0>>
- [50]<<http://www.havel-composites.com/shop/46-Jednosmerne/711-Uhlikova-vlakna-jednosmerna-spojene-mrizkou-250gmspan-stylefont-size-8pxsup2supspan.html?pls=0>>
- [51]<<http://www.havel-composites.com/shop/46-Jednosmerne/3260-Uhlikova-vlakna-jednosmerna-spojena-mrizkou-30-gmspan-stylefont-size-8pxsup2supspan-sire-50-cm.html?pls=0>>
- [52]<http://www.alibaba.com/product-gs/122297575/1k_Carbon_fiber_fabric_119gsm.html>
- [53]<http://cn-txw.en.alibaba.com/product/355676322-209454782/Carbon_Fiber_Cloth.html>
- [54] <http://www.alibaba.com/product-gs/257851563/3K_carbon_fiber_cloth.html>

SEZNAM OBRAZKŮ

- Obr. 1 Alotropy uhlíku
- Obr. 2 Základní stav elektronové konfigurace uhlíkového atomu
- Obr. 3 Excitovaný stav elektronové konfigurace uhlíkového atomu
- Obr. 4 Struktura benzenového jádra s delokalizovanými elektrony
- Obr. 5 Krystalová mřížka grafitu
- Obr. 7 Turbostratický uhlík [1]
- Obr. 8 Turbostratická struktura uhlíku - trojrozměrný model [1]
- Obr. 9 Modely struktury příčných řezů uhlíkovými vlákny (1. řádek => vlákna z PAN;
2. a 3. řádek vlákna ze smol) [1]
- Obr. 10 Výroba uhlíkových vláken – schéma [21]
- Obr. 11 Vlastnosti uhlíkových vláken vyrobené z PAN a z mezifázové smoly
- Obr. 12 Možnosti použití uhlíkových vláken
- Obr. 13 Předpokládaná poptávka odběratelů uhlíkových vláken v MT pro rok 2011[22]
- Obr. 14 Předpokládaná výroba uhlíkových vláken v MT pro rok 2011[22]
- Obr. 15 Výrobci ultra-vysoko-modulových, uhlíkových vláken, a jejich typy vláken
- Obr. 16 Výrobci vysoko-modulových uhlíkových vláken, a jejich typy vláken
- Obr. 17 Výrobci středně-modulových uhlíkových vláken a jejich typy vláken
- Obr. 18 Výrobci standardně-modulových uhlíkových vláken a jejich typy vláken z PAN
- Obr. 19 Výrobci standardně-modulových uhlíkových vláken a jejich typy vláken ze smol
- Obr. 20 Výrobci vysoko-pevnostních uhlíkových vláken a jejich typy vláken
- Obr. 21 Graf ULTRA-vysokolomulových uhlíkových vláken
- Obr. 22 Graf vysokomulových uhlíkových vláken
- Obr. 23 Graf středně modulových uhlíkových vláken
- Obr. 24 Graf standardně modulových uhlíkových vláken
- Obr. 25 Graf vysokopevnostních uhlíkových vláken
- Obr. 26 Poměr předpokládané výroby uhlíkových vláken a jeho využití [22]

- Obr. 1 <<http://piotreksohieraj.wordpress.com/page/2/>>
 <<http://batteryblog.ca/wp-content/uploads/2010/06/graphite.gif>>
 <http://www.google.cz/imgres?q=uhl%C3%ADk&hl=cs&biw=1280&bih=890&gbv=2&tbm=isch&tbnid=fuIMYQM65i2WlM:&imgrefurl=http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_08_mat.php&docid=0dYjdzD88dAym&imgurl=http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_08/mrizDiamant.jpg&w=200&h=200&ei=oWfVT rGDNYPJswbUs6GnDg&zoom=1&iact=rc&dur=494&sig=118116839281951472473&page=1&tbnh=156&tbnw=160&start=0&ndsp=21&ved=1t:429,r:2,s:0&tx=32&ty=64>
 <<http://sk.wikipedia.org/wiki/Lonsdaleit>>
 <<http://akademon.cz/default.asp?source=1001>>
 <http://www.google.cz/imgres?q=uhl%C3%ADkov%C3%A1+nanotrubi%C4%8Dka&hl=cs&gbv=2&biw=1280&bih=890&tbm=isch&tbnid=67ORBBOrQBmIBM:&imgrefurl=http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_08_mat.php&docid=0dYjdzD88dAym&imgurl=http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_08/nanotrubi%C4%8Dka.gif&w=200&h=200&ei=FHTVTrO0F-Oh4gTJ5rijAQ&zoom=1&iact=rc&dur=90&sig=118116839281951472473&page=1&tbnh=160&tbnw=160&start=0&ndsp=21&ved=1t:429,r:8,s:0&tx=87&ty=97>
 Obr. 4 <<http://ustavchemie.sci.muni.cz/laboratore/lessons/Aromatickeslouceniny/index.html>>
 Obr. 5 <<http://www.ped.muni.cz/wphy/FyzVla/FMkomplet4.htm>>
 Obr. 11 <<http://www.toray.com>>
 Obr. 12 <<http://brent-kutzle-lover.blog.cz/>>
 <<http://www.mnpctech.com/CarbonFiber.html>>
 <<http://nextbigfuture.com/2011/02/lexus-uses-carbon-fiber-loom-to-use-50.html>>
 <<http://www.zoltek.com/applications/infrastructure/>>
 <http://www.bilsing.cz/images/stories/dokumenty/lep_flex_fertiger_tsch.pdf>
 <<http://verosary.com/carbon-fibre-panels-honeycomb-yachts/>>
 <<http://www.fiddlersgreen.net/models/miscellaneous/Wind-Turbine.html>>
 <<http://21století.cz/blog/2007/08/17/handicap-mizi-protezy-lepsi-nez-nohy/>>
 <<http://www.freshnessmag.com/2011/01/31/audi-carbon-skis-carbon-fiber-skis-concept/>>
 <<http://www.powerhousemuseum.com/collection/blog/index.php/tag/carbon->

fibre-bicycle/>
<<http://www.rajrybaru.cz/pruty/starbaits/>>
<<http://hudebniforum.cz/elektricke-kytary/jake-se-vam-libi-kytary-les-paul-t9282-580.html>>
<<http://nextbigfuture.com/2011/02/lexus-uses-carbon-fiber-loom-to-use-50.html>>
<<http://www.mnpctech.com/CarbonFiber.html>>
<http://brent-kutzle-lover.blog.cz/>>

SEZNAM WEBOVÝCH STRÁNEK VÝROBCŮ

- (1) Toray Industries Inc.: [online]. Dostupné na WWW:
<<http://www.toraycfa.com/product.html>>
<<http://www.torayca.com/index2.html>>
- (2) Hexcel Inc., [online] Dostupné na WWW:
<http://www.hexcel.com/Products/Aerospace/ACF_ContFibers>
<http://www.hexcel.com/Resources/SelectorGuides/CarbonFiber_SelectorGuide_us.pdf>
- (3) Aksa, [online]. [03/2011] Dostupné na WWW:
<<http://www.aksacausa.com/CF-Catalogue.pdf>>
- (4) Pyrograf Products, Inc. [online]. [2008] Dostupné na WWW:
<<http://www.nano-enhanced-wholesale-technologies.com/carbon-nano-fibers/features.htm>>
<<http://www.voyle.net/Nano%20Biz-05/NanoBiz-05-0032.htm>>
- (5) Cytec. Inc.: [online]. [07-11-06] Dostupné na WWW:
<<http://www.cytec.com/engineered-materials/carbon-fiber-index.htm>>
<<https://www.cytec.com/engineered-materials/thornel-pan.htm>>
<<https://www.cytec.com/engineered-materials/thornel-pitch.htm>>
<<https://www.cytec.com/engineered-materials/products/Datasheets/DKD%20Rev%20A%207-13-06.pdf>>
- (6) Mitsubishi Rayon. Co., Ltd. [online]. [2008] Dostupné na WWW:
<<http://www.mrc.co.jp/english/products/special/index.html#01>>
<<http://www.grafil.com/>>
<<http://www.grafil.com/grafilproducts.html>>
<<http://www.grafil.com/pyrofil.html>>
- (7) Nippon Graphite Fiber Corporation., [online]. Dostupné na WWW:
<<http://www31.ocn.ne.jp/~ngf/english/product/p1.htm>>
<<http://www31.ocn.ne.jp/~ngf/english/product/p4.htm>>
<<http://www31.ocn.ne.jp/~ngf/product/img/p1/pdf/yshafiber.pdf>>
- (8) Mitsubishi Plastic, Inc., Vlákná DAILED [online]. Dostupné na WWW:
<http://www.yes-mpi.com/en/carbon/pdf/carbon_catalog.pdf>
- (9) Toho Tenax, [online]. Dostupné na WWW:

- <<http://www.tohotenax-eu.com/produkte/tenax/filamentgarn.html>>
- <<http://www.tohotenax.com/tenax/en/products/index.php>>
- <<http://www.tohotenaxamerica.com/contfil.php>>
- (10) SGL Group, [online]. Dostupné na WWW:
- <http://www.sglgroup.com/export/sites/sglcarbon/_common/downloads/products/product-groups/cf/carbon-fibers-for-braided-packings-and-askets/SIGRAFIL_C_PAN_Based_Carbon_Fiber_e.pdf>
- <http://www.sglgroup.com/cms/_common/downloads/products/product-groups/cm/textile-products/Bauverstaerkungsmaterialien_aus_Carbonfasern_e.pdf>
- (11) Toho Rayon [online]. Dostupné na WWW:
- <<http://www.matweb.com/search/GetMatlsByTradename.aspx?navletter=B&tn=Besfight%C2%AE>>
- (12) Kmrock Industries and Export Limited, [online]. Dostupné na WWW:
- <<http://www.kemrock.com/commercial-carbon-fibre.php>>
- (13) Formosa Plastic Group [online]. Dostupné na WWW:
- <http://www.sagecarbon.com/cms/index.php?option=com_content&view=section&layout=blog&id=2&Itemid=8>
- (14) Zoltek: [online]. Dostupné na WWW:
- <<http://zoltek.com/applications/cngpressure-vessels/>>
- <<http://www.zoltek.com/products/panex-35/>>
- <<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=48d4f18581db428f9f2f04662910a6ea>>
- <<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=9c88835b81264c84ac5f1cdbc7ebef42>>
- (15) Kureha Chemical Industires, [online]. Dostupné na WWW:
- <http://www.kureha.com/Kureha_Carbon_Products_Brochure.pdf>
- (16) Svetlogorsk „Khimvolokno“ [online]. Dostupné na WWW:
- <<http://www.sohim.by/en/about/>>
- (17) Bluestar Fibres Company Limited, [online]. Dostupné na WWW:
- <<http://www.bluestarfibres.com/page.php?path=product>>

PŘÍLOHY

Příloha 1

Firma: TORAY INDUSTRIES, INC. (1)

| TORAYCA | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm ³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|---------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| T300 | 3,53 | 230 | 1,76 | 10,4 | 17 |
| T400HB | 4,41 | 250 | 1,8 | 10,5 | 16 |
| T700SC | 4,9 | 230 | 1,8 | 9,37 | 16 |
| T800HB | 5,49 | 294 | 1,81 | | |
| T800S | 5,88 | 294 | 1,81 | | |
| T1000G | 6,37 | 294 | 1,8 | 32 | 14 |
| M35JB | 4,51 | 343 | 1,75 | 39 | 11 |
| M40JB | 4,4 | 377 | 1,77 | 68,6 | 10 |
| M40 | 2,74 | 392 | 1,81 | - | 8 |
| M46JB | 4,21 | 436 | 1,84 | 84,5 | 9 |
| M55J | 4,02 | 540 | 1,91 | 155,6 | 8 |
| M55JB | 4,02 | 540 | 1,91 | 155,6 | 8 |
| M60J | 3,92 | 588 | 1,94 | 151,8 | 7 |
| M30S | 5,49 | 294 | 1,73 | | |
| M30G | 5,1 | 294 | 1,73 | | |

Příloha 2

Firma: HEXCEL (2)

| HEXFORCE | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm ³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| AS2C (3K) | 4,44 | 221 | 1,8 | | |
| AS4 (3K) | 4,50 | 231 | 1,73 | | |
| AS4 (6K) | 4,33 | 231 | 1,78 | | |
| AS4 (12K) | 4,475 | 231 | 1,79 | | |
| AS4D (12K) | 4,75 | 245 | 1,79 | | |
| IM2C (12K) | 5,72 | 296 | 1,78 | | |
| IM7 (6K) | 5,31 | 276 | 1,78 | | |
| IM7 (12K) | 5,67 | 276 | 1,78 | | |
| IM9 (12K) | 6,14 | 304 | 1,8 | | |
| IM10 (12K) | 6,964 | 303 | 1,79 | | |
| AS7 (12K) | 4,83 | 241 | 1,79 | | |
| IM6 (12K) | 5,74 | 279 | 1,79 | | |
| IM2A (12K) | 5,45 | 276 | 1,78 | | |
| IM2A (6K) | 5,10 | 276 | 1,78 | | |

Firma: AKSA (3)

| AKSACA | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm ³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| A-38 (3K) | 3,5 | 235 | 1,76 | | |
| A-38 (6K) | 3,5 | 235 | 1,76 | | |
| A-42 (12K) | 4,2 | 240 | 1,76 | | |
| A-42 (24) | 4,2 | 240 | 1,76 | | |
| A-49 (12K) | 4,9 | 240 | 1,8 | | |

Firma: PYROGRAF PRODUCTS INC. (4)

| PYROGRAF | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm ³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|-------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Pyrograf I | 7 | 600 | 2,1 | 1950 | 55 |
| Pyrograf IV | 7 | 600 | 1,9 | | 55 |

Příloha 3

Firma: CYTEC (5)

| THORNEL | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm ³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| T-300 | 3,75 | 231 | 1,76 | 5 | 18 |
| T-650 | 4,28 | 255 | 1,77 | 14 | 15 |
| T-650/35 | 4,28 | 241 | 1,77 | 14 | 14,9 |
| T-650/42 | 4,62 | 290 | 1,78 | 15 | 14,2 |
| P-25 (2K) | 1,56 | 159 | 1,92 | 36 | 12 |
| P-25 (4K) | 1,56 | 172 | 1,9 | 26 | 13 |
| P-30 | 1,38 | 207 | 2 | 62 | 10 |
| P-55S (2K) | 1,9 | 379 | 2 | 120 | 8,5 |
| P-55S (4K) | 1,9 | 414 | 2 | 120 | 8,5 |
| P-75S | 2,07 | 517 | 2,05 | 185 | 7 |
| P-100S | 2,41 | 759 | 2,15 | 520 | 2,5 |
| P-120S | 2,41 | 828 | 2,18 | 640 | 2,2 |

| THERMAL GRAPH | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm ³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|---------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| DKD | 1,378 | 690-828 | 2,15-2,20 | 400-650 | <3 |
| K-1100 | 3,1 | 965 | 2,2 | 1000 | 1,3 |

Firma: MITSUBISHI RAYON (6)

| GRAFIL INC. | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm ³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|----------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 34-700 | 4,83 | 234 | 1,8 | 7 | |
| 34-700WD | 4,83 | 234 | 1,8 | 7 | |
| 34-600 | 4,5 | 234 | 1,8 | 7 | |
| 34-600WD | 4,5 | 234 | 1,8 | 7 | |
| 34-700 unsized | 4,83 | 234 | 1,8 | | |

Příloha 4

| PYROFIL | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm ³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|-------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| TR30S | 4,41 | 235 | 1,79 | 7 | |
| TR50S (6K) | 4,9 | 235 | 1,82 | | |
| TR50S (12K) | 4,9 | 240 | 1,82 | | |
| TR50S (15K) | 4,9 | 240 | 1,82 | | |
| TRH50 (12K) | 4,9 | 255 | 1,81 | | |
| TRH50 (18K) | 5,3 | 250 | 1,82 | | |
| MR40 | 4,41 | 295 | 1,76 | 20 | |
| MR60H | 5,68 | 290 | 1,81 | | |
| MS40 | 4,41 | 345 | 1,77 | | |
| HR40 | 4,41 | 395 | 1,82 | 45 | |
| HS40 | 4,61 | 455 | 1,85 | 52 | |

Příloha 5

Firma: NIPPON GRAPHITE (7)

| GRANOC | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm ³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|-----------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| CNG-90 | 3,1 | 880 | 2,21 | 500 | |
| CN-80 | 3,43 | 780 | 2,17 | 320 | |
| CN-60 | 3,43 | 620 | 2,12 | 140 | |
| XN-100 | - | - | 2,22 | 900 | |
| YSH – 70A | 3,63 | 720 | 2,14 | | 3,63 |
| YSH – 60A | 3,9 | 630 | 2,12 | | 3,9 |
| YSH – 50A | 3,9 | 520 | 2,1 | | 3,9 |
| YS – 95A | 3,53 | 900 | 2,19 | 600 | 3,53 |
| YS – 90A | 3,53 | 880 | 2,18 | 500 | 3,53 |
| YS – 80A | 3,63 | 785 | 2,17 | 320 | 3,63 |
| CN – 90 | 3,43 | 860 | 2,19 | | 3,43 |
| CN – 80 | 3,43 | 780 | 2,17 | | 3,43 |
| CN – 60 | 3,43 | 620 | 2,12 | | 3,43 |
| CNG – 90 | 3,1 | 880 | 2,21 | | 3,1 |
| Xn – 15 | 2,4 | 155 | 1,85 | | 2,4 |
| Xn – 10 | 1,7 | 110 | 1,7 | | 1,7 |
| Xn – 05 | 1,1 | 54 | 1,65 | | 1,1 |
| YSH – 50A – 04S | 3,9 | 520 | 2,1 | | 3,9 |
| YSH – 70A – 04S | 3,63 | 720 | 2,14 | | 3,63 |
| YT – 50A – 04H | 3,83 | 400 | 2,08 | | 3,83 |
| YT – 40A – 04H | 3,83 | 500 | 2,1 | | 3,83 |

Příloha 6

Firma: MITSUBISHI CHEMICAL (8)

| DAILED | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm ³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|--------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| K223SE | 2,35 | 185 | 2 | | |
| K223Y1 | 1 | 50 | 1,5 | | |
| K223HE | 3,8 | 900 | 2,2 | | |
| K223HG | 3,8 | 900 | 2,2 | 540 | |
| K223QG | 3,23 | 590 | 2,1 | 140 | |
| K6371T | 2,6 | 640 | 2,1 | 140 | |
| K6611T | 1,77 | 180 | 1,9 | | |
| K1352U | 3,6 | 620 | 2,12 | 140 | |
| K1392U | 3,7 | 760 | 2,15 | 210 | |
| K13B2U | 3,8 | 830 | 2,16 | 260 | |
| K13C2U | 3,8 | 900 | 2,2 | 620 | |
| K13D2U | 3,7 | 935 | 2,2 | 800 | |
| K13A1L | 3,7 | 790 | 2,15 | 220 | |
| K13710 | 2,6 | 640 | 2,12 | 140 | |
| K13A10 | 2,6 | 790 | 2,15 | 220 | |
| K32112 | 1,6 | 190 | 1,93 | 20 | |
| K63312 | 2,6 | 440 | 2,09 | 110 | |
| K63712 | 2,6 | 640 | 2,12 | 140 | |
| K63B12 | 2,6 | 860 | 2,15 | 400 | |
| K223QM | 3,23 | 590 | 2,1 | 140 | |
| K6371M | 2,6 | 640 | 2,1 | 140 | |
| K223HM | 3,8 | 900 | 2,2 | 550 | |

Příloha 7

Firma: TEIJIN TOHO TENAX (9)

| TENAX | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm ³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|-------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| HTA40 (1K) | 3,95 | 238 | | | |
| HTS40 (24) | 4,3 | 240 | | | |
| STS40 (24K) | 4 | 240 | | | |
| STS40 (48K) | 4 | 250 | | | |
| UTS50 (12K) | 4,8 | 240 | | | |
| UTS50 (24K) | 5 | 245 | | | |
| IMS60 (24K) | 5,7 | 290 | | | |
| IMS65 (24K) | 6 | 290 | | | |
| UMS40 (24K) | 4,6 | 395 | | | |
| UMS45 (12K) | 4,6 | 430 | | | |
| HTS40 (12K) | 2,75 | 215 | | | |

Firma: SGL GROUP (10)

| SIGRATEX | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm ³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|----------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| KDU 1091 | >4 | 240 | 1,8 | | |
| KDU 1092 | >4 | 240 | 1,8 | | |

| UDO | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm ³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|--------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| CS 200 | >4 | 240 | 1,8 | | |
| CS 300 | >4 | 240 | 1,8 | | |
| CS 250 | >4 | 240 | 2,12 | | |

Příloha 8

| SIGRAFIL C | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|-------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| C30 S003/6 PUT | 4 | 240 | 1,8 | | 14 |
| C30 S003/6 APS | 3,6 | 240 | 1,8 | | 14 |
| C10 M250 UNS | 2,5 | 180 | 1,75 | | 18 |
| C30 M250 UNS | 3,6 | 240 | 1,8 | | 14 |

| SIGRA - LF | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|-------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 350 - 450 | | | | 160-210 | 5,5-7,5 |
| 350 - 450 | | | | 2220-270 | 4,9-5,7 |
| 500 - 650 | | | | 250-280 | 4,5-5,5 |
| 700 - 800 | | | | 250-300 | 4,0-5,5 |

| PANOX | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|--------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| FM T320 EEA | 0,21 | | 1,39 | 0,4 | >108 Ωm |
| SMT 320 EEA | 0,21 | | 1,38 | | |
| FB T320 EEA | 0,21 | | 1,37 | | |
| FM C063 SSC | 0,21 | | 1,39 | | |
| SM C063 SSC | 0,21 | | 1,38 | | |
| SM C076 SSC | 0,21 | | 1,38 | | |
| FM C063 EEA | 0,21 | | 1,39 | | |
| SM C063 EEA | 0,21 | | 1,38 | | |
| FB M400 EEA | 0,21 | | 1,37 | | |

Příloha 9

Firma: TOHO RAYON (11)

| BESFIGHT | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm ³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|-------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| HTA-7C NS01 | 4,14 | 234 | 1,75 | | 15 |
| IMA-7C EP03 | 4,96 | 290 | 1,74 | | 14 |
| IMA-5C EP03 | 5,58 | 286 | 1,79 | | 14 |
| HMA-7C EP01 | 3,31 | 359 | 1,78 | | 10 |
| UMA-5C A303 | 4,76 | 427 | 1,82 | | 10 |
| UMA-5C F301 | 4,14 | 538 | 1,92 | | 10 |
| HTA-7C F301 | 4 | 240 | 1,75 | | 15 |

Firma: FORMOSA PLASTICS GROUP (12)

| TAIRYFIL | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm ³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|----------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| TC-33 | 3,45 | 230 | 1,8 | | |
| TC-35 | 4 | 240 | 1,8 | | |
| TC-36s | 4,9 | 250 | 1,81 | | |
| TC-42 | 5,17 | 290 | 1,8 | | |

Firma: KREMROCK (13)

| JAITEC | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm ³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|--------|------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Jaitec | 2-3 | 180-250 | 1,73-1,78 | | |

Příloha 10

Firma: ZOLTEK (14)

| PANEX | Tensile Strength [GPa] | Tensile Modulus [Gpa] | Density [g/cm ³] | Thermal conductivity [W/mk] | Electrical Resistivity [Ωμm] |
|----------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| PANEX 35 | 4,137 | 242 | 1,81 | | 15,5 |
| PANEX 33 | 3,8 | 228 | 1,81 | | 17,2 |
| PANEX 33 MF | 3,8 | 228 | 1,81 | | 15,5 |
| PANEX 33 MX | 3,8 | 228 | 1,81 | | 17,5 |
| PANEX 30 MF | 3,6 | 207 | 1,75 | | 14 |